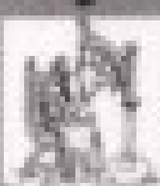
戴念祖 著

中国读本



中国古代物理学

物理，古人云『事物的道理』，为历代大儒名宦所重。古代中国人不仅记述了许多物理现象，发现了一些物理规律或定理，尚有饱含物理知识的诗词歌赋传世。

中国国际广播出版社

图书在版编目（CIP）数据

中国古代物理学 / 戴念祖著. —北京：中国国际广播出版社，2010.8
（中国读本）
ISBN 978-7-5078-3158-0

Ⅰ.①中… Ⅱ.①戴… Ⅲ.①物理学史—中国—古代 Ⅳ.①04-092

中国版本图书馆CIP数据核字（2009）第230786号

中国古代物理学

著　　者	戴念祖
责任编辑	徐丽丽　陶丽娟
版式设计	国广设计室
责任校对	徐秀英
出版发行	中国国际广播出版社（83139469　83139489[传真]）
社　　址	北京复兴门外大街2号（国家广电总局内）
	邮编：100866
网　　址	www.chirp.com.cn
经　　销	新华书店
印　　刷	北京广内印刷厂
开　　本	640×940　1/16
字　　数	55千字
印　　张	8
版　　次	2010年8月 北京第一版
印　　次	2010年8月 第一次印刷
书　　号	ISBN 978-7-5078-3158-0/O·2
定　　价	12.80元

目　录

引　言

中国物理学史是中国科技史中最年轻的学科。直到20世纪晚期，通过几代人的努力，我们才有了它的一个大概轮廓。

研究物理学史，若能发现历史上有数量关系的物理规律，如声学中弦线长度与音高关系，那就是科学文化上的珍宝。此外，另一个重要的方面是，发现古代人认识到了多少物理现象并用文字记载下来。因为，“现象是物理学的根源”。杨振宁先生曾如是说到：

物理学最重要的部分是与现象有关的。绝大部分物理学是从现象中来的。现象是物理学的根源。一个人不与现象接触不一定不能做重要的工作，但是他容易误入形式主义的歧途；他对物理学的了解不会是切中要害的。我所认识的重要的物理学家都很重视实际的物理现象。[①]

古代中国人的确记录了大量实际的、经验的或技术意义上的物理现象。

研究中国物理学史的困难在于其史料极为零散。不像天、算、农、医那样，有成本的著作供人学习、研究。即使《考工记》、《墨经》、《梦溪笔谈》等著作也只有一小部

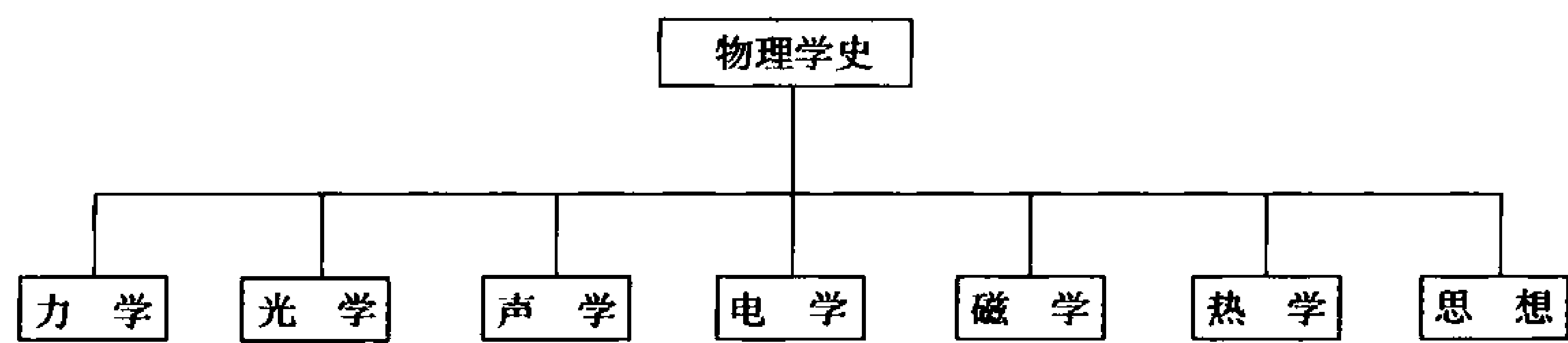
---

① 杨振宁：《谈谈物理学研究和教学》，见《杨振宁文集》，华东师范大学出版社，1998年版，第508页。

分文字与物理学相关。然而，在古代图书分类的经、史、子、集四部中，几乎没有一本是丝毫不涉及物理现象的著作。难度在于，必须将整本书认真读完，脑中紧绷物理学各种概念，或许你能在该书中识别出一两句确实涉及与物理学相关的物理现象的文字。先秦典籍《考工记·国有六职》中说："粤无镈。"为什么？又说："粤之无镈也，非无镈也，夫人而能为镈也。"

"镈"即今日的农具——锄。在粤国市肆上没有锄的买卖，不是因为该国无锄，而是其国人人都能制造锄。这种情形与阅读古代典籍、寻觅物理现象的记载颇为相似。

中国古代物理学史有如图中之架构：



以下将分别简述力学史、光学史、声学史、指南针和罗盘的历史。因篇幅所限，热学史、中国传统的物理思想、明清时期西学东渐过程中西方物理学在中国的传播等内容均不涉及。

第一章

力学史

一 “力学”词义演变

“力学”一词是中国传统术语，但在明季之前，未有Mechanics之意。例如：宋代周密《齐东野语》述及王俊民其人，“性刚峭不可犯，有志力学”。在中南海西门对面有条胡同，名“力学胡同”。这里的“力学”都是“努力学习”之意。

明天启七年（1627），王徵（1571—1644）与邓玉函（T. Terrent，1576—1630）合译《远西奇器图说》一书。书中最早将Mechanics译为“力艺”。“力艺者，重学也”，“学乃公称，重乃私号”。王徵最早确定了翻译西方各门类科学名称的法则。1840年后，出现了如“静重学”、“动重学”、“水重学”、“气重学”、“流质重学”、“天重学”等名称，它们分别对应于今日之静力学、动力学、水力学、气体力学、流体力学、天体力学。

1866年，美国教士丁韪良（A. W. Martin，1827—1916）译《格物入门》一书。书中将西文Mechanics译为力学。此后，“力学”的传统意义，即努力学习之意渐被忘却，而它作为科学术语逐渐流行开来。

1906年，清朝学部编译《力学课编》，作为京师大学堂教材。

二 《墨经》中的力学知识

《墨经》是先秦墨家的代表作。在中国传统文化上，它是一本罕见的奇书、异书。

《墨经》文简意赅。全文4篇，约180条。每条少则三五字，多则百余字。全书分为《经》和《说》两部分。《经》是定义性条文，《说》为释《经》文字。《说》文每条的头一二个字是标牒字，与同条《经》文的前一二两个字相同，用以牒经标题，易以检索。全书内容以逻辑学居多，自然科学次之。自然科学中以物理学、几何学居多。物理学中尤重力学、光学。

《墨经》力学涉及杠杆、滑轮、斜面、平衡、力、合力、应力、材料、浮体、转动、自由落体、时空运动12种物理现象的定义或解释。

举例说明如下。

《经上》:“力，刑（形）之所以奋也。”

《经说上》:“力，重之谓下。举重，奋也。”

《经》文是对“力”作定义。“刑”即今谓有形体。“奋”原指鸟展翅从田野飞起，墨家借此形容有形体的状态改变。一个物体的状态发生变化是要用力的，故谓“力，形之所以奋也”。例如，重物往下降落，欲将重物举起，则需“奋”，也即要用力。

又如浮体，《墨经》这样说：

《经下》："形之大，其沉浅也。说在衡。"

《经说下》："形，沉形之衡也，则沉浅。非形浅也，若易五之一。"

这是说，形体很大的物，浮在水面上，其下沉入水的部分很"浅"（少）。这就是平衡。《经》文定义之后，《说》文进而作解释。浮体（形）与其沉入水中的部分平衡，是沉入部分"浅"，而非浮体（形）本身浅。这二者之关系犹如市肆交易，以5件甲种物品换1件乙种物品一样。

显然，墨家在浮体认识上没有阿基米德（Archimedes，前287—前212）表述得那么清楚。似乎墨家未曾看出沉入水中的那部分形体，正是它所排开的相同水量，这排水之重等于整个浮体（形）之重。但是，墨家指出"若易五之一"，又似乎表明他们并不糊涂。

关于自由落体，《经说下》写道："凡重，上弗挈，下弗收，旁弗劫，则下直。"在这里指出了重物自由下落的"必要"条件。

关于时空，《墨经》令时间为"久"，空间为"宇"，并定义如下。

《经上》："久，弥异时也；宇，弥异所也。"

《经说上》："久，古今旦暮；宇，东西家南北。"

这个时空定义是正确的。尤其在《说》中，指出"家"（空间坐标参考点）的重要性。没有"家"，空间方向性就迷失了，则将"西家谓之东家，东家谓之西家，虽皋陶之

理不能定其处”（《淮南子·齐物训》）。

墨家创始人墨翟，生活于公元前5世纪至前4世纪初，鲁国人（一说为宋国人）。以墨子为首的墨家是先秦时期科学与技术成就最大的学派。遗憾的是，汉代起，墨家消失，墨学断绝，《墨经》散佚。又《墨经》字简意赅，后人难以为解。时至今日，对其中许多条文的句读与解释亦莫衷一是。

三 《考工记》中的经验力学

有人说《考工记》是春秋末年齐国官书。从科技史看，它是春秋战国时期有关手工生产的科学技术文献，是当时手工制度和技术规范的汇集。

《考工记》一书涉及手工技术中6大工种（木工、金工、皮工、色工、刮磨工、抟埴工），包括30个门类，如制车、兵器、乐器、容器、玉器、皮革、丝织、染色、陶瓷、建筑、水利，等等。在制车工艺中，又分为车架、轮、毂、辐、箱、盖弓等手工技艺。其他各工种莫不如此。手工工艺的专门化与分工精细的倾向是当时手工业生产技术高度发达的标志。与科学相关的是，该书叙述了各门类手工生产的设计要求、制作规范、数量比例关系，还力图说出其中的道理。在这些道理中，含有相当多的物理学经验知识。

《考工记·辀人》详细记述了拉车走平地和上坡的不同用力情形，指出“登阤（斜）者，倍任者也”。物理学讲“斜面省力”，是对举重物和以斜面升重（同重同高）二者比较而言的。《荀子·宥坐》是以物理学观点讲斜面的：

三尺之岸而虚车不能登也，百仞之山任负车登焉，何则？陵迟故也。

实质上，《考工记·辀人》、《荀子·宥坐》和物理学所讲都是同一个道理。

又如，《考工记》述及检验一个车轮是否圆的方法：

凡察车之道，必自载于地者始也，是故察车自轮始。凡察车之道欲其朴实而微至。不朴实，无以为完久；不微至，无以为戚速也。

凡是检查一辆车子好坏，必先从车轮开始。看它是否与地平面仅有“微至”的接触。一个车轮的周边与地面都是接触于一点（微至），这个车轮就必定是圆的。这个检查车轮是否圆的经验，在今天仍被自行车修理工所采用。

先秦木工检察车轮的经验，引出了墨家对轮（或圆）作出定义：“环俱柢”。“环”即圆形物，“柢”是树根。圆物边上处处都似有根，这个“根”即指与地面接触。战国时期辩者公孙龙又提出与墨家完全相反的命题：“轮不蹍地”。轮与地面接触仅是“微至”，一点点；整轮子却不与地面接触。这些学派从工匠经验中作出的思辨，无疑对物理学的产生极有帮助。可惜，在中国古代类似思想火花太少了。

《考工记》叙述箭镞制造及其各部分比例对箭矢飞行的

影响，涉及青铜钟、磬制造及其发音，都饱含了力学、声学知识。

自汉以降，《考工记》成为儒家经典《周礼》中的一篇。中国传统的力学（或物理学）就沿着《考工记》之路一直走到明清之际。这条路就是经验力学、技术力学。

四 相对运动

古代中国人对相对运动有较深刻的认识。

晋代束皙说："仰游云以观，日月常动而云不移。"（《隋书·天文志》）

晋代葛洪说："见游云西行，而谓月之东驰。"（《抱朴子·内篇·塞难》）

梁元帝萧绎《早发龙巢》一诗中有"不疑行舫动，唯看远树来"之句。

这些都是相对运动的例子。束皙还提出，"乘船以涉水，水去而船不徙矣。"也就是说，束皙想到，河中漂流的船并不在运动之中。与此相映成趣的是，古希腊亚里士多德说："不能同时踏进同一条河流。"可惜，束皙未曾引申到"船也不能同时停泊在同一条河中"的思辨结论。

成语"刻舟求剑"指出了判断谁在运动时坐标的重要性。故事出自《吕氏春秋·慎大览·贵因篇》：

楚人有涉江者，其剑自舟中坠于水，遽契其舟。曰：

“是剑之所从坠”。舟止，从其所契者入水求之。舟已行矣，而剑不行。求剑若此，不亦惑乎？

要找到剑，坐标取在哪儿，确实需要有一定的力学知识才行。

缓慢爬行的蚂蚁，若其行走于迅速转动的磨（或碾）边上，或蚁顺磨转而动，或蚁逆磨转而动，如何确定蚁的速度，视觉结果是什么性状？这是汉代王充《论衡·说日篇》和《晋书·天文志》中曾经讨论的问题。古人设日、月为天空中的蚁，而天球设为磨，日月右行，天球左行。坐标取在哪，就会得出“天左旋”还是“天右旋”的古人旷日持久之争。《晋书·天文志》的结论是：

天旁转如推磨而左行，日月右行，随天左转。故日月实东行，而天牵之以西没。譬之蚁行磨石之上，磨左旋而蚁右去，磨疾而蚁迟，故不得不随磨以左回焉。

以相对运动的观点并不能绝对地确定作相对运动的二物是哪一个在动，哪一个静止。唐代《敦煌曲子·浪淘沙》中曾就船只与远山之运动关系写道：

看山恰似走来迎。仔细看山山不动，是船行。

这个道理并不为众人全知晓。天文学家哥白尼（N·Copernicus，1473—1543）在其名著《天体运行论》中曾引用古希腊人的诗句“我们离港向前航行，陆地和城市后退了”，并以此推测出日心地动说。这种相对运动的物理现象显然不足于证明地球在运动；自然，也不足以证明地球不运动。解决这种两难的处境需要动力学，需要相对论。

五　相对性原理

相对性原理（relativity principle）是爱因斯坦建立相对论的两大支柱之一。它的意思是：在一个惯性坐标系中，任何力学的、光学的或电磁的实验都不能发现该坐标系是否在运动。另一个支柱就是，光速不变。

相对性原理的思想或表述，早在汉代就被中国人做出来了。汉代成书的《尚书纬·考灵曜》中写道：

地恒动不止，而人不知。譬如人在大舟中，闭牖而坐，舟行而人不觉也。

平稳而匀速运动的舟近似一个惯性坐标系，关上门窗坐于舟内，无论你在这大舟中做什么，你都不能从你的感觉中或实验规律中来发现该舟的运动与否，也就是“舟行而人不觉”。以此证明“地恒动不止”，是古代人物理理论与物理思想的高峰之一。

在《考灵曜》之后约1500年，伽利略（G·Galilei，1564—1642）在其著《两大世界体系的对话》（1632年出版）中表述了与《考灵曜》相同思想的文字。只不过他描述了在这个大舟中的种种力学实验，如苍蝇、蝴蝶和小飞虫的飞行、跳跃，等等。他以这些实验要说明的一个基本思想就是“舟行而人不觉”。

在伽利略之后又过了将近3个世纪，人们才认识到，提

出在封闭船舱中“舟行而人不觉”这一说法的重要意义，并把它称之为“伽利略相对性原理”。爱因斯坦进而推广，即使光学的、电磁的实验也不能发现这样的惯性系是否处在静止或运动之中。这就成了建立狭义相对论的两大支柱之一。

六　弹性定律

弹性定律是材料力学中反映固体特性的一个重要规律。说的是，弹性材料的变形与其作用力成正比。这个规律是英国科学家胡克（R·Hooke，1635—1703）首先提出来的，故而通常称为胡克定律。可是，在胡克之前约1500年，汉代人已述及弹性物体（如弓弩的弓干）的这种特性。

弓弩是古代重要作战利器，也是射远武器。中国历代宫廷极重视其制造，尤以秦汉和先秦时期为重。那时候，弓弩制作坊造好一具弓弩后，都要称量其拉力，并将此拉力数值刻写在弓弩上或登记造册。当此弓弩发至边寨或屯戍烽台，又要进行拉力核校，以便分发将士使用。故而，秦汉典籍多有“千钧弩”、“百石弩”、“弯弓三百斤”等记载。居延汉简中，刻有从一石到十石之弩文字上百次，且有准确到斤两的情况。可见“量其力”是整个弓箭制造流程中不可或缺的一步。

《考工记·弓人》说：“量其力，有参均。”“参均”者何意？抑或测量弓弩拉力积累了大量数据，还是有人认真

地作了重复测拉力实验，以至汉代经学家郑玄（127—200）终于作出了弓干拉力与其变形关系的叙述。他在《周礼·考工记》注疏中写道：

参均者，谓干若胜一石，加角而胜二石，被筋而胜三石，引之中三尺；假令弓力胜三石引之中三尺，弛其弦，以绳缓擐之，每加物一石，则张一尺。

古代的弓弩之干是由普通干（或竹、木料所制）、牛角片和牛筋三部分组成的复合材料。引文前一句，说出材料强度随加固材料的增多或增厚而增强。后一句，说出弹性材料的外力与其本身变形成正比，并且严格定义该材料的强度极限“弓力胜三石，引之中三尺”。后一句，正是后来人们所说的弹性定律的表述式。

唐代贾公彦在《周礼·考工记》注疏中以另一种说法表述弹性定律。他说：

谓（弓）不张之，别以一条绳系两箫。乃加物一石张一尺，二石张二尺，三石张三尺。

迄宋代，大将杨承信（921—964）与弓箭制作使魏丕曾以弹性定律改造弓弩。宋代江少虞辑《事实类苑》卷十四，《宋书·魏丕传》对此都有文字记载。

七　横梁高宽比

中国具有木构建筑的传统。选择一根好的横梁木，是

建造新屋的大事。如何选取抗弯曲、抗断裂的木材作为横梁，又是材料力学的内容之一。

在早期人类建房中，必定有人认为以一根整圆木作梁是坚固耐用的。大概经过几百年、上千年的摸索，才发现矩形木材比圆木更结实。又过了许多年月，才知道矩形木的高宽比例要适当，才能作为梁木使用，又不致浪费材料。

《国语·周语》中，有“不厚其栋，不能任重”一语。“栋”即梁木，“厚”指其高度。梁木的“厚”要比其宽大，才能承载巨大负荷。《易经·大过》这一卦的卦词以“栋桡”（向下桡）或“栋隆”（向上桡）比喻该卦是凶还是吉。它解释说：“栋桡，本末弱也”。“栋桡，凶。象曰，栋桡之凶，不可以有辅也”；“栋隆，吉。有它吝。象曰：栋隆之吉，不桡乎下也。”这正是基础材料力学知识在《易经》占卜中的运用。

《九章算术·句股》第4问，是一道从圆木截出矩形木的算题。它得出矩形木的高宽比为：高：宽＝3.43：1。这种梁木显得高瘦，抗弯有余，材料浪费太多。这大概是汉唐间木工的保守经验的总结。

北宋，将作监李诫（？—1110）主持京城和皇宫建筑。为节约材料和统一管理，他规定了房屋各种构件的大小尺寸或比例，编修建筑名著《营造法式》一书。在该书中，他确定梁木大小为：

凡梁之大小，各随其广分为三分，以二分为其厚。

这里的“广”与“厚”是对梁木稳定置于地面上（即

平放）而言。若将其架在屋架上（即竖放）作架，其“广”就是本书所言的“高”，“厚”是本书所言的“宽”。因此，这种梁木的高（a）宽（b）比为：

$$a:b=3:2$$

这里一个非常科学的比例数字（见图1）。

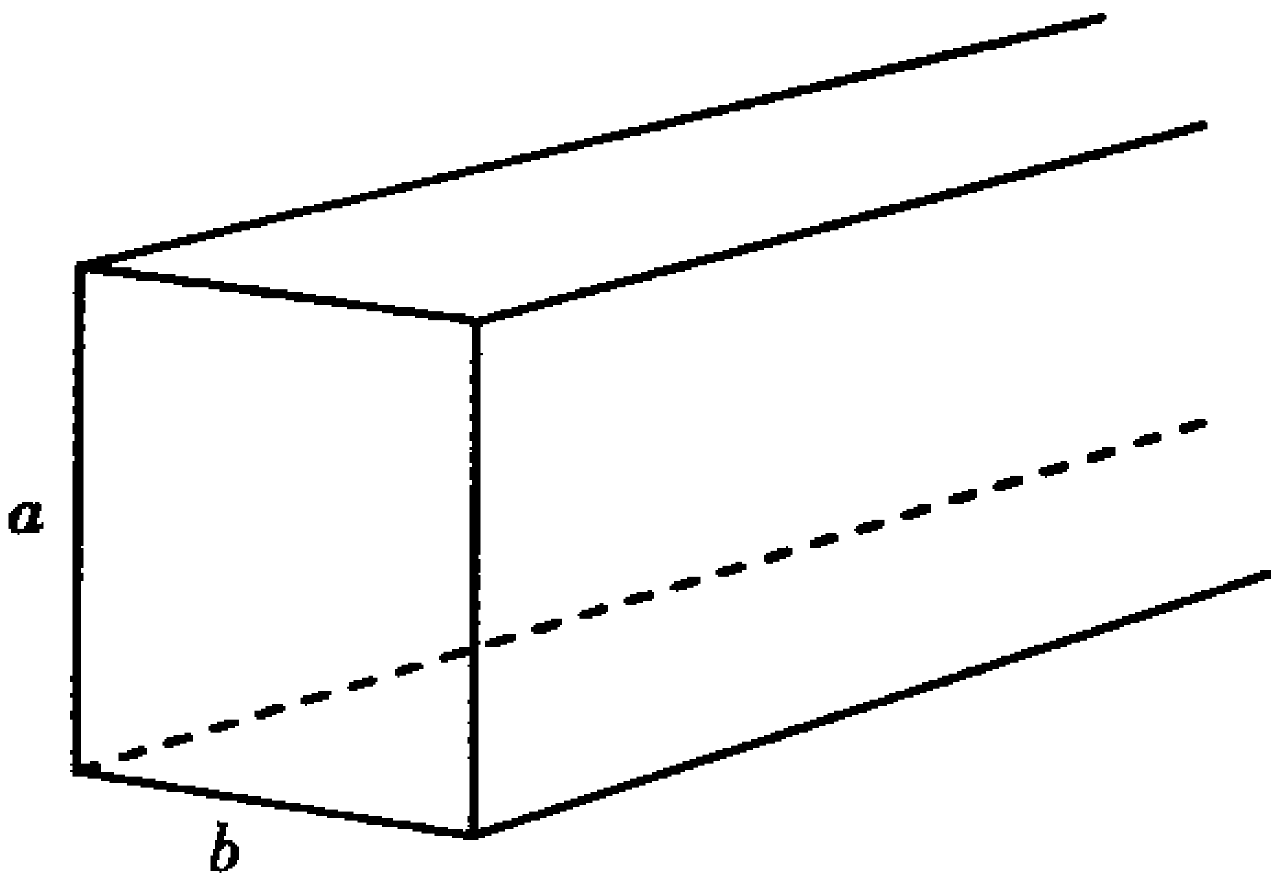


图1 横梁高宽比

西方是砖石结构的建筑传统。因此，直到达·芬奇（L. Da Vinci，1452—1519）时，才进行初步的梁木承重实验。伽利略在《两门新科学对话》中作了矩形木平放与竖放的承重实验，得到竖放时材料强度大的结论。但他未进一步取得一个合理的比数。

1702年，法国数学家和物理学家帕朗特（A. Parent，1666—1716）讨论了从圆木中截取最大强度矩形梁的方法，结论是，梁断而高宽比应为$\sqrt{2}:1$。这个比数相当于2.8:1。又一个多世纪后，英国物理学家托马斯·杨（Thomas Young，1773—1829）在1807年证实，刚性最大的梁，其高宽比为$\sqrt{3}:1$。这个比数相当于

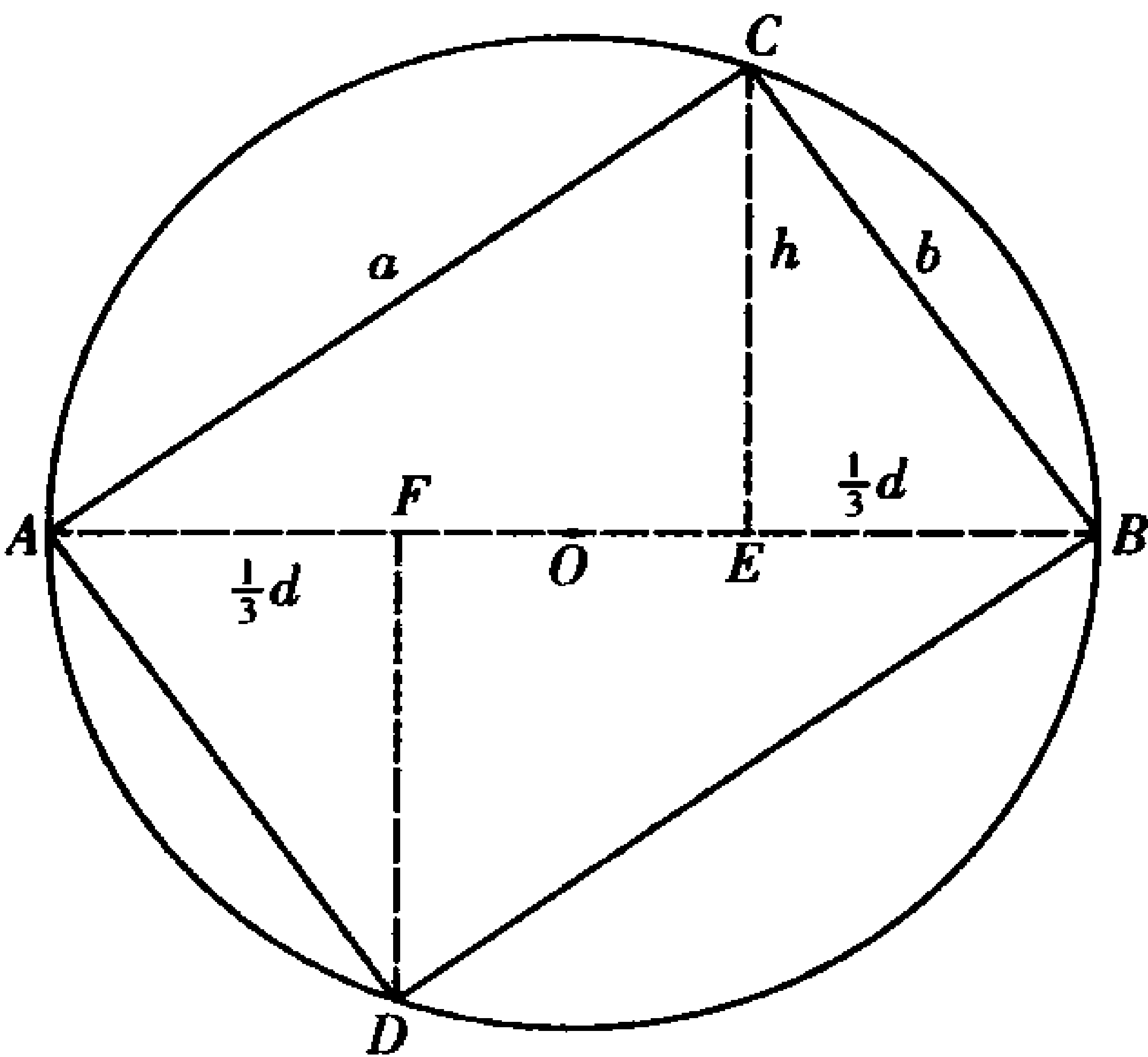


图2 帕朗特从圆木可截取最大强度矩形梁的方法

3.46∶2。李诚的比数在这两者之间，既考虑材料的强度，又照顾到它的刚度。

帕朗特从圆木中截取最大强度矩形梁的方法是：将圆木直径 AB 三等分，在等分点 E、F 上分别对直径两侧作垂线，交圆于 C、D，矩形 ABCD 即要截取的梁，如图 2。图中 $a:b=\sqrt{2}:1$，是个中学几何题，读者有兴趣不妨去试作证明。

八　水箱放水实验

水箱放水实验是这样进行的：两个完全相同的等容水箱 A 与 B，盛满同质等高 h 的水；一个水箱底部开一大孔 S_a，另一个底部开数小孔 S_{nb}，令数小孔面积之和等于大孔面积，即：

$$S_a=\sum_{n=1}^{m}S_{nb}$$

同时打开箱 A 与 B 的孔，问哪个水箱内的水先放完？（图 3）

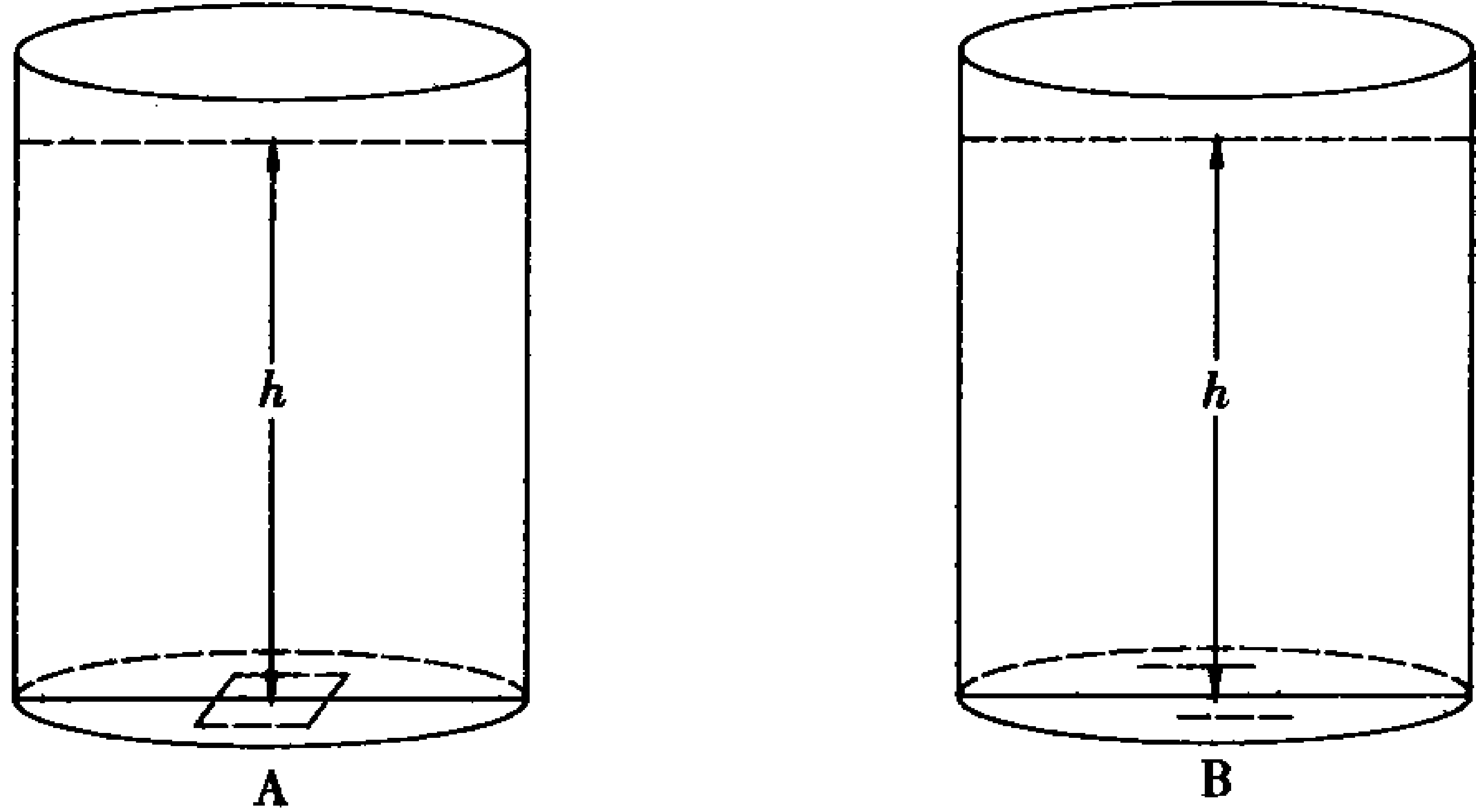


图 3　水箱放水实验

这个实验最早是明代徐有贞（1407—1472）做的。

明代方以智在《物理小识》卷二《地类》中有段文字：

徐有贞张秋治水，或谓当浚一大沟，或谓多开支河。乃以一瓮窍方寸者一，又以一瓮窍方分者十，并实水发窍，窍十者先竭。

这里的瓮即水箱。从文字上看，似乎并未明指两瓮开孔窍的面积相等。其实，按中国文化传统，比较事物的快慢、轻重、大小等问题时，必要以等距、等时或等积、等面为前提。《孟子·告子下》说："金重于羽者，岂谓一钩金与一舆羽之谓哉？"

方以智记述了徐有贞实验的前提条件：两瓮中一个开一大孔，以方寸为单位，设为1平方寸；另一个开10个小孔，以方分为单位，则每个小孔面积当为：2分×5分或10分×1分。实验结果是，窍10个小孔的水箱先将水放完。

徐有贞放水实验，除了方以智的文字，《明史·徐有贞传》、李东阳（1447—1516）的《宿州符离桥月河记》中亦有记述。徐有贞于景泰三年（1452）官左佥都御史而往山东张秋治河。在如何治理黄河的问题上，历代两派剧争：一者主张疏通原河道；一者主张多开支河。徐有贞此时遇到了与前辈治河者相同的问题。为了说服皇朝近臣，他在明代宗朱祁钰面前做了这个水箱放水实验。他以开分水河治黄成功后，得到当地百姓和史家赞颂。张秋河湾地区百姓唱道："昔也，河湾如地之狱；

今也，河湾如天之堂。”

类似徐有贞的水箱放水实验，在西方是于 19 世纪时进行的。法国数学家、工程师蓬瑟勒（Jean-Victor Poncelet，1788—1867）及其合作者洛斯布罗斯（Losbros）于 1827—1835 年做了这样的实验；美国矿业工程师、流体力学家史密斯（Hamilton Smith，1840—1900）于 1885 年又重复了这个实验。从理论上讲，水箱底部孔窍的出水量 Q 与孔面积 S、放水时间 t 和箱内水高 h 关系：

$$Q = St\sqrt{2gh}$$

但实际上的放水量要在这个等式间加入一个放水系数 k，即：

$$Q = kSt\sqrt{2gh}$$

西方人是为了测定这个放水系数 k 而做种种放水实验的。他们发现，当小孔直径小于 1 英寸时（1 英寸 = 2.54cm），k 随孔径减少而增加。因此，当两个箱的孔面积相等时，开小孔的水就先放完。当然，实际放水量还与小孔形状、开孔边的几何形状都有关系。

在科学史上，徐有贞是值得大书特书的。然而，在史家笔下，他却是个奸臣。他处于明朝“土木之变”、“英宗复辟”的动乱岁月。当“土木之变”，明英宗朱祁镇之弟朱祁钰继位时，徐有贞力倡迁都南京，以示正统；仅 7 年之后，他又暗中将朱祁镇从永定门外接入宫廷，成为“英宗复辟”之大功臣。在深得英宗宠信、集文武大权于一身时，

他乱杀功臣良吏。此后不久，他自己也在宦海内讧中失宠被贬，其晚年放浪于山水之间。

九 “舟自横”现象

唐代韦应物（737—790）诗《滁州西涧》：

独怜幽草涧边生，上有黄鹂深处鸣。

春潮带雨晚来急，野渡无人舟自横。

小学生都能熟背此诗，但其中力学道理未必众所周知。在河流中停泊的船，为何自动“横”过来，即船身与水流方向垂直。其原因就是椭圆长轴与水流垂直时为稳定平衡的缘故。古代中国人虽未道明这个力学原因，但他们观察并记录了大量的“舟自横”现象。

宋代寇准《春日登楼怀旧》：“高楼聊引望，杳杳一川平；野水无人渡，孤舟尽日横。”

宋代廖世美《烛影摇红——题安陆浮云楼》之后阕：“晚霁波声带雨，悄无人，舟横野渡。数峰江上，芳草天涯，参差烟树。”

《三国演义》第四十九回“七星坛诸葛祭风，三江口周瑜纵火”。该回描述诸葛亮借得东风后，知周瑜不容，连夜赶回蜀属地夏口；子龙来接，而吴国大将徐盛奉命追杀亮。此时，“赵云拈弓搭箭，立于船尾大叫曰：‘吾乃常山赵子龙也，奉命特来接军师，你如何来追赶？本待一箭射你死

来，显得两家失了和气，教你知我手段。’言讫，箭到处，射断徐盛船上篷索。那篷索落下水，其船便横。赵云却叫自家船拽起满帆，乘风而去……”①

这些文字，表明古代中国人是善于抓住物理现象的。

① 后三条史料是由天津大学王振东教授最早发现的。王振东：《力学与实践》，2006年第3期，第83—85页。

第二章

光学史

古代中国人观察到并记录下许多光学现象，如光源（冷光源、热光源）、影、像（小孔成像与镜面成像）、颜色、视觉成因、色散和大气光象等；制造了各种镜（平面镜、凹面镜、凸面镜、表面不等曲率的反射镜、各种透镜、放大镜与组合透镜等）；对镜面成像、衍射与宝石变彩也有大量记载。它们构成了古代丰富的光学史。

在大量的古代典籍中，有一些较集中地记述了光学现象，如《墨经》，南唐谭峭《化书》，宋代沈括《梦溪笔谈》，元代赵友钦《革象新书》，清代郑复光《镜镜诊痴》、邹伯奇《格术补》和《摄影之器记》等。古代光学较早被公认为发展较好的物理学之一。

一 《墨经》光学

墨家创始人墨翟重视劳作与生产。这个学派在墨翟带领下很可能做了一些光学实验。《墨经》中有 8 条文字连续地记下光学事实。它们依次是：论影，光源与影的关系，以小孔照相匣实验证明光的直进性质，光反射，物与光源相对位置与影子大小之关系，平面镜成像，凹面镜成像，凸面镜成像。前后 8 条，寥寥数百字，而条理清晰、逻辑严

谨，光源、影与像均有涉及，从而奠定了几何光学的知识基础。

就影子而言，《墨经》认为，“景（影）不徙，说在改为”，“景二，说在（光源）重”，“景之小大，说在（物）斜正远近”。

顺便提及，由物影而形成的一门艺术，即影戏，在中国几千年不衰。其发展之完备，以至18世纪传人欧洲时，令其士绅们大为赞赏。

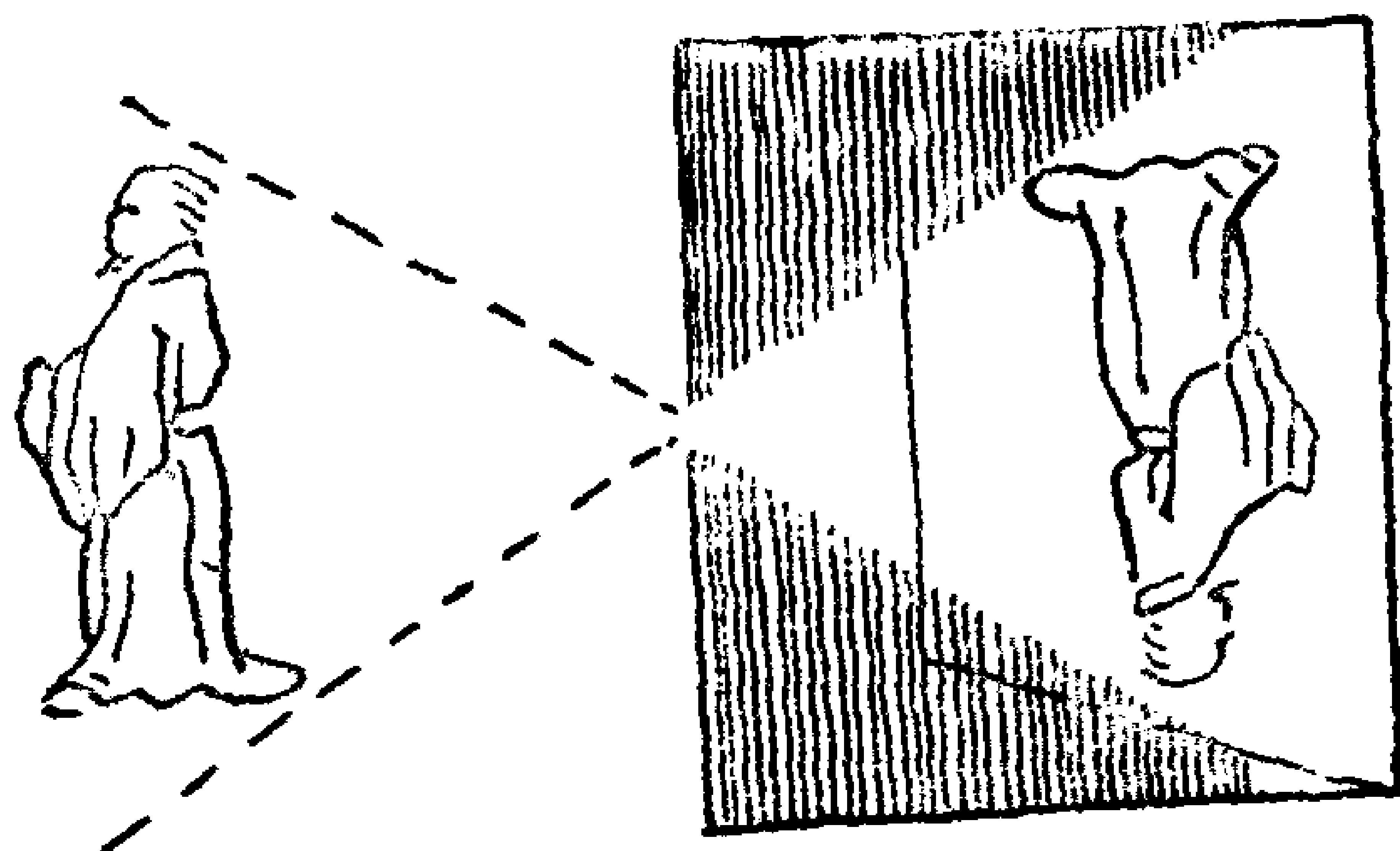


图4　小孔照相匣实验

《墨经》中小孔照相匣实验是这样论述的：

《经下》：“景倒，在午有端与景长，说在端。”

《经说下》：“景，光之人煦若射。下者之人也高，高者之人也下。足蔽下光，故成景于上；首蔽上光，故成影于下。在远近有端与于光，故景库内也。”

见图4。“午”原意为一纵一横，此处形容上下交错的光线；“端”原意为点，此处指小孔。“光之人煦若射”，即光照射到人身上，就像射出的箭，是笔直前进的。“下者之

人也高，高者之人也下”是说照射在人上部的光线，则成像于下部；而照射在人下部的光线，则成像于上部。于是，直立的人通过小孔成像，投影便成为倒立的。“库”指暗盆内部而言。“在远近有端与于光”，指出物体反射的光与影像的大小同小孔距离的关系。物距越远，像越小；物距越近，像越大。

做平面镜反射成像实验时，墨家将平面镜置于地面，人或物“临鉴而立”。或许，墨家干脆是用置于地上的一盆水作镜子。由于“临鉴而立”，因此“景（像）倒”。在实验表述中，墨家指出了平面镜的对称现象：照镜者与其像“当俱，就去亦当俱。俱用北（背）”。平面镜的物与像“背”向对称被历代许多文人所描述。萧梁朝王孝孔《咏镜诗》写道：

可怜不相识，终须因镜中。

分眉一等翠，对面两边红。

转身先见动，含笑逆相同。

犹嫌镜里促，看人未好通。

包括月眉、脸面红脂、转身以及“含笑”都“逆相同”，正是镜面对称的特征。

墨家称凹面镜为“鉴洼”。做凹面镜实验时，墨家将凹面镜的焦点与其镜心（凹面曲率的中心）之间的距离称为“中”。因此，他们的实验记录中说：“鉴洼，景（像）一小而易（倒），一大而正，说在‘中’之外、内。”这个记录是完全正确的。

据考古发现，春秋战国时期，中国有青铜阳燧，即铜制凹面镜。阳燧对日起火的那一点，就是焦点。墨家并非不懂焦点，而是他们对实验作了忠实记录。他们以凹面镜照自己脸面，从而记下了自己所观察到的镜面成像情况。当凹面镜由远而近观察者过程中，观察者看到的，先是一个缩小的倒立实像迎面而来；当镜与观察者眼睛的距离接近镜心时，像逐渐模糊，以至不能辨。因为此时像与眼之距离小于人眼视距（25cm）；当镜更靠近人眼，倒立的实像已在人之脑后，自然不被人所见。这段成像模糊、乃至不见像的距离，墨家称其为“中”。当镜更近人眼，眼已过“中”而在焦点之内，此时眼睛又恢复了见像的情形，不过，这是在镜背形成的放大且正立的虚像。

据悉，20世纪20年代，剑桥大学曾以类似墨家实验作考题。笔者20世纪80年代也曾以此题作研究生考题，鲜有人能正确解答。他们多以教科书中凹面镜成像作解，竟然忘却在“中”这段距离内看不到像。

《墨经》中称凸面镜为“鉴团”，说它的像只有一种，且为正立的像（虚像）。这也是完全正确的实验记录。

二 《梦溪笔谈》与《革象新书》

《梦溪笔谈》是宋代沈括的著作，科学史家赞之为古代科学的坐标性之作。

沈括（1031—1095），字存中，北宋钱塘（今杭州）人，是学识渊博的学者和政治活动家。早年曾官沭阳（今属江苏）主簿，疏通沭水而得良田千顷。嘉祐年间进士，先官扬州司理参军，后入京官昭文阁校勘。神宗初，官提举司天监，主持改制天文仪器，编修奉元历。熙宁年间，参与王安石变法，曾察访淮南、两浙，推行青苗、水利新政。熙宁八年（1075）出使辽国，著《使契丹图抄》，后拜翰林学士，权三司使。元丰三年（1080）官鄜延路（今延安等地）经略安抚使，肩御西夏入侵之责。受永乐（今陕西米脂县西北）失守之累，谪均州（今湖北均县西北），后调秀州（今浙江嘉兴），再后居润州（今江苏镇江市）。在润州筑梦溪园，著《梦溪笔谈》等书。

《梦溪笔谈》为笔记体裁，内含丰富的科学、技术文字。就光学而言，该书涉及油膜干涉色彩、衍射色彩、物体颜色及其透光之色、各种冷光（萤囊、腐烂鸭蛋发光，微生物发光与液态磷化氢的发光），总结了冷光本质“有火之用，无火之热”。特别是，在其对各种曲率的反射镜作出成像描写并解释中，首次对凹面镜的焦点与焦距作了记述：“离镜一二寸，光聚为一点，大如麻菽”；在光学上第一次提出了“格术”的物理概念，以此总括小孔与凹面镜成倒像的几何光路。这个概念对后来中国光学的发展起了极大作用。

自《墨经》之后，人们对小孔成像现象作了大量记载，对其成倒像的原因、物与像大小关系、小孔大小对像的影

响，都有所分析。小孔成像还成了诗人笔下的佳句。萧梁朝学者沈约《咏月诗》写道：

月华临静夜，

夜静灭氛埃。

方晖竟户入，

园影隙中来。

“园影隙中来”正是对小孔成像的描写。“隙”是古代常用以描述小孔的用词，“园影”是太阳的像。当太阳、佛塔、小孔与屏（墙壁）在一个恰当位置时，人们可在墙上看见远方佛塔的倒像。扬州东市塔影倒垂的“怪事”，从唐代段成式（约803—863）记载以来，被宋元学者经常讨论，甚至吸引了一些文人特意到扬州看塔之倒影。于是，宋朝末年宗室赵友钦作了一个大型光学实验，以检验小孔成像。这个实验记载于赵友钦著作《革象新书》卷五《小隙光景》中。

实验在一个两层楼内进行。上层天花板上挂着活动影屏，可调节影屏的高度。下层分为两半室：一半置桌，桌上放光源，或不置桌，令光源置于地，从而加大光源与小孔距离；另一半作平台，使平台与桌面高等同。在这两层楼之间的楼板上开孔，其上可放置园板，不同的园板上开有大小不同、形状不同的小孔（图5）。改变光源的强弱、形状与大小，改变小孔形状及大小，改变像距，在各种不同条件下观察屏上像的大小、浓淡与形状。光源从几支烛光到上千支烛光。赵友钦以此实验获得了小孔成像的诸多

科学结论。诸如小孔时，像与光源形状同，光源强弱、物距与像距远近对像的浓淡之影响；大孔时，并无光源之像，而是如孔之形。相关的文字叙述充满几何意味，结论中得到光学中近似“照度”的概念。

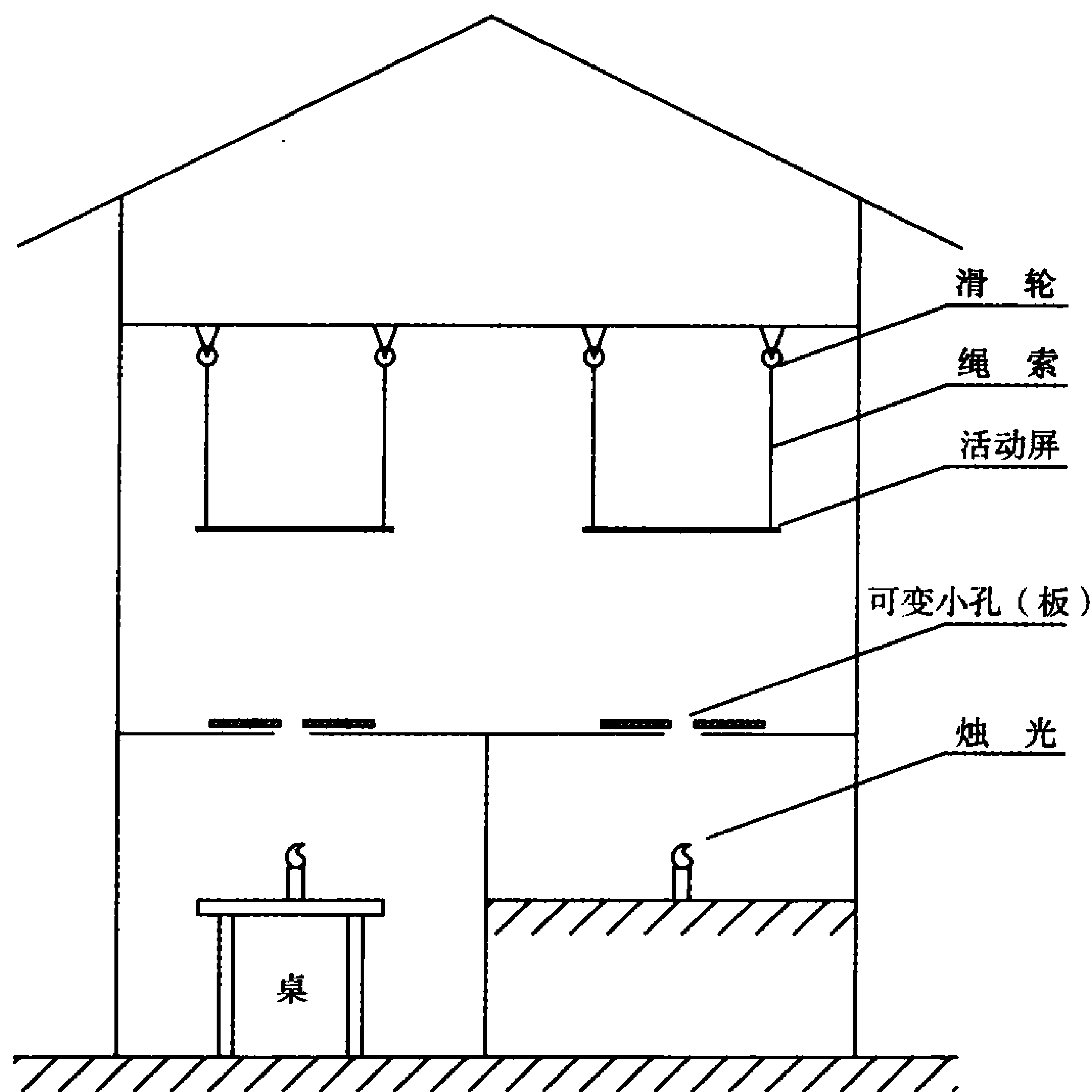


图5 小隙光景——小孔成像实验

三 放大镜与潜望镜

这两种镜都是中国人最早发明的。

放大镜实际上就是一个凸透镜。当物体放在凸透镜焦

点之内时，就可以看到一个放大的正立虚像。北宋晚期，刘歧（？—1117）在其著《暇日记》中记述了侦刑官员在京城审讯囚犯时，遇不清的案牍卷宗便取出水精镜辨之。古代的微雕工艺品上刻有图画、诗词，甚至整卷佛经，其中“宫室人物、山水花木禽鸟，其细若缕”（陶宗仪《辍耕录》卷五《雕刻精绝》）。如此之“鬼工”，若无放大镜的使用，是断乎不能的。

潜望镜是组合平面镜。汉代淮南王刘安（前179—前122）组织编纂的《淮南万毕术》中记述道：“高悬大镜，坐见四邻。”

汉代高诱注曰：“取大镜高悬，置水盆于其下，则见四邻矣。”

从形态上讲，这是一种开管式潜望镜，是近代潜望镜的雏型。北周庾信（513—581）在其《咏镜诗》中对此亦有描述：

玉匣聊开镜，轻灰暂拭尘。

光如一片水，影照两边人。

月生无有桂，花开不逐春。

试挂淮南竹，堪能见四邻。

四　透镜及复合透镜

中国传统的透镜是水晶透镜。玻璃透镜是从西域传入

的。水晶透镜又称“珠”、“水晶珠”。古代人也用它点火，而且有许多考古发掘的凸透镜。

南唐道士谭峭，珍藏有四种透镜，分别称之为“圭、珠、砥、盂”。在其著《化书》卷一《四镜》中描述了它们各自的成像：“圭视者大，珠视者小，砥视者正，盂视者倒”。按此成像以几何光学知识推测，此四镜应分别为：平凸透镜（圭）、双凸透镜（珠）、平凹透镜（砥）、凹凸透镜（盂）。谭峭是中世纪期间藏有透镜类型最多的人，并且对它们的成像一一作出了描述。

将不同透镜组合在一起，就成为一种复合透镜。宋代人称谓的“鲫鱼杯”或“青华酒杯”就是其中之一。

宋代何薳（生卒年不详）在其著《春渚纪闻》卷九叙述了鲫鱼杯：“有一鲫，长寸许，游泳可爱。水倒出，鱼不复见。复酌水满中，须臾一鱼泛然而起。以手取之，终无形体可拘。”宋代一本佚名者所撰《真率笔记》也说：“关关赠俞本明以青华酒杯，酌酒辄有异香在内，或有桂花或梅或枣，视之宛然，取之若影。酒干亦不见矣。俞宝之。”

这种酒杯是这样制作的：在杯内底放入一枚小小的凸透镜，并在其焦点内嵌入一小片类鱼、类花的小物件。当杯内盛上酒或水时，就可见嵌入物的放大的虚像（图6）。因为盛水或酒后，水或酒本身成了一片平凹透镜。凸透镜与水相接的凸面，也即是水底的凹面。虚像是凸透镜与平凹透镜的组合效应。近年，商家在杯内嵌入明星小照片，

举杯饮酒，则见明星在杯内微笑之，酒兴由是大发。孰不知此乃祖宗近千年前之作品矣。

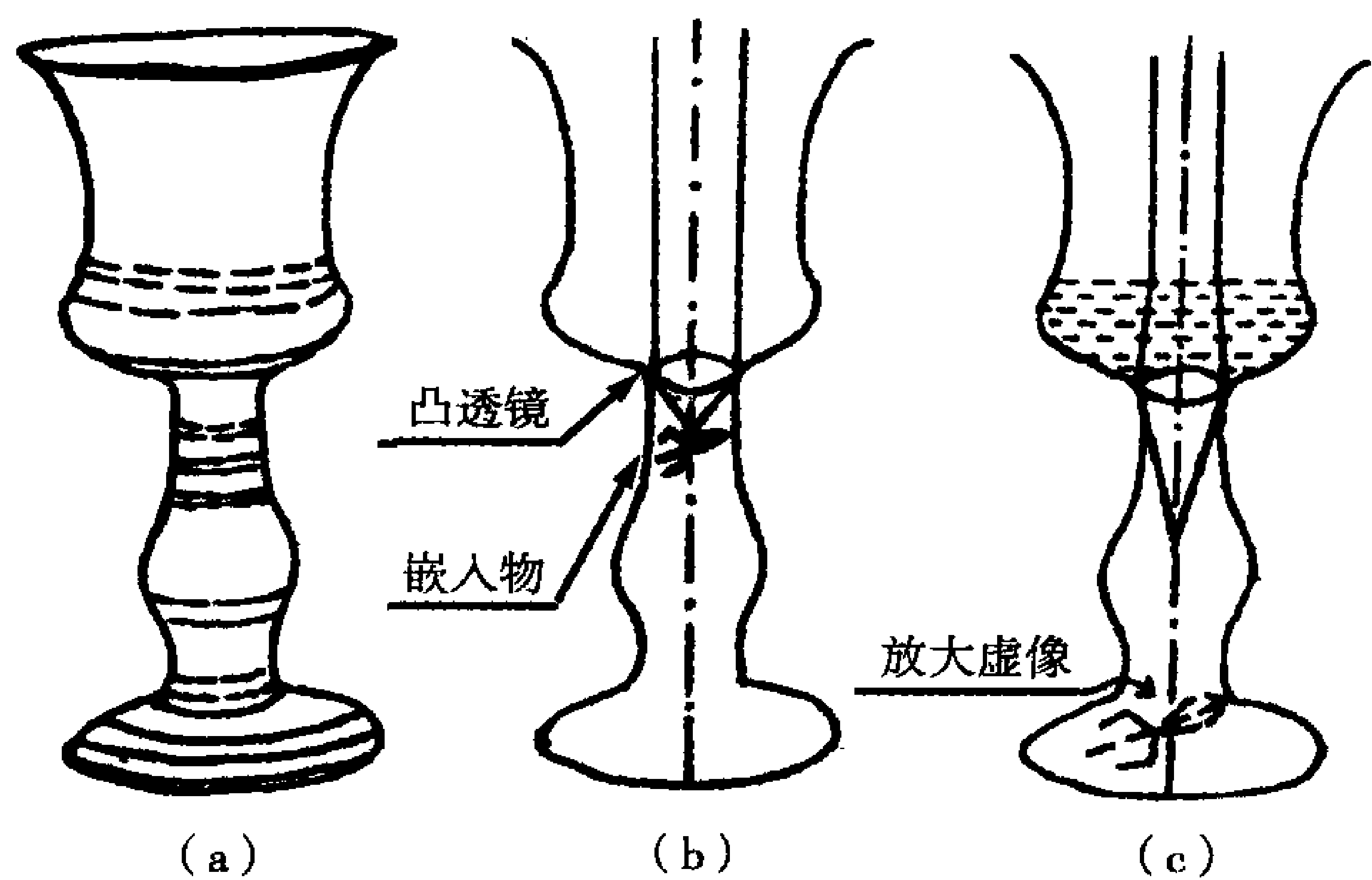


图6　青华酒杯及其成像图
a 酒杯模型，取自山东安丘景芝镇出土龙山文化陶制高脚杯；b 空杯剖面图及凸透镜光路；c 盛酒（或水），见杯底放大虚像

讲到透镜，中国古代有一项成就远在欧洲人之前，这就是冰透镜的发明。用冰块做成透镜，并用它对日取火，至晚为汉代人所知晓。汉代淮南王刘安在《淮南万毕术》中说：

削冰令园，举以向日，以艾承其影，则火生。

值得注意的是，做冰透镜的冰块必须是天然冰。人造冰不能用，因其内有气泡。再则，造冰透镜方法极巧妙，不必刀削斧砍，只要将大金属壶装上温水，用它在冰块上压旋几转，一个大冰透镜立可做成。因为，传统的烧水用的壶，其底是个圆凹面。清代郑复光曾以此法造冰透镜。

五　透光镜之谜

“透光”镜，是青铜制造的平面镜。当其反射阳光时，反射光斑中显露出镜背文字与花纹。其魔幻如此，遂以为阳光穿过镜体，将镜背花纹一一映射，故称其为“透光镜”。

众所周知，除紫外光外，在紫外线以内的长光程光不能透过青铜物质。透光镜的奥秘，就在其表面并不平整，而是与其背面相同，故于反射光斑中见背面的文字及花纹图案。

如何制造透光镜使它能“透光”?

宋代沈括首次揭开其秘密。他认为镜背图案使镜差厚。由是，铸镜过程中因热胀冷缩令镜体收缩率不同，故镜面隐隐有同背面相似花纹，人眼不识，以阳光照之则显。元代吾邱衍认为是在镜面以稍浊之铜填补铸成的。清代郑复光则认为，铸镜中因需刮磨表面令其平整，因之，令镜面产生了与镜背相同的纹迹。经过近年实验，这些方法都能做成透光镜。

据考古发现，早在战国和西汉时期已有透光镜。较早的文字记载见之于北周庾信的《镜赋》:

镜乃照胆照心，难逢难值。镂五色之盘龙，刻千年之古字。山鸡看而独舞，海鸟见而孤鸣。临水则池中月出，

照日则壁上菱生。

最后一句所描述的正是透光镜的效果。

此后，隋大业七至十三年间（611— 617），王度在《古镜记》中描述其镜“承日照之，则背上文墨尽人影内，纤毫无失”。

然而，“透光镜”三字出现于唐代，清代冯云鹏兄弟辑录的《金石索》中有一唐代八卦镜，镜背铭文有“透光宝镜”等字样。宋代沈括在《梦溪笔谈》中说：

世有透鉴，鉴背有铭文。凡二十字。字极古，莫能读。以鉴承日光，则背文及二十字皆透在屋壁上，了了分明。

透光镜在历史上颇多，制造并不困难。清代郑复光在其著《镜镜诊痴》（约 1835 年成书）中专辟一篇讲《透光镜》，并说：

透光镜，人争宝焉。不知湖州所铸双喜镜，乃日常用品，往往有之，非宝也。

郑复光以水面作比喻，论述了透光镜表现“凹凸有迹”、“起伏不平”，从而造成反射光斑中的图像。他还提醒人们，注意玻璃制品中可能出现类似现象。从而他亦为当代精密仪器的制造发出了警告。

透光镜传到日本后，日本学者称其为“魔镜”。大约 19 世纪初传到欧洲。从 1832 年旅居印度的学者普林塞普（J. Prinsep）在《亚洲学会会志》中发表“论中国的魔镜”起，到 1932 年，英国物理学家、1915 年诺贝尔物理奖获得者布拉格（W. H. Bragg，1862—1942）写下讨论它的同题之

作，整100年的时间，透光镜引起欧洲人极大兴趣。参与相关学术讨论的还有著名英国光学家布儒斯特（D. Brewster，1781—1868），法国光学家阿拉戈（F. J. Arago，1786—1853）。1877年，Nature（Vol. 16）杂志还为此开展了专门讨论。这是中国历代透光镜铸造师们都未曾想到的事。

六　虹霓和分光现象

虹霓、彩虹或雨虹，从甲骨文始便有许多文字记载。

人们早已知道雨虹产生的气象条件。唐代，孔颖达（574—648）在注疏《礼记·月令》时明确指出：

若云薄漏日，日照雨滴则虹生。

“雨滴”之说已接近虹产生的科学见解：即雨滴对阳光的反射和折射。因此知识广为人所知，故唐宋时期已有儿童在做造虹实验。唐代张志和（744—773）在《玄真子》中曾记下“背日喷水成霓虹之状”。宋代人苏鹗又指出，唐大中年间（847—860）“京城小儿叠布蘸水，向日张之”，即令湿布喷洒水滴于空中，便能见虹，唐人称此为“捩晕”。

除雨虹外，典籍中还记有冰珠、露珠和晶体的分光现象。北周庾信《郊行值雪》诗写道：

雪花开六出，冰珠映九光。风云俱惨惨，原野共茫茫。

庾信不仅记下雪花结晶六角形状，而且最早记下了阳

光通过冰珠折射后多彩的“九光”现象。唐初孔德绍（？—623）又在《登白马山护明寺》内描写了露珠折射阳光的色彩：“露花疑濯锦，泉月似沉珠”。宋代程大昌（1123—1195）在其著《演繁露》中进而解释了露珠分光现象：

凡雨初霁或露之未晞，其余点缀于草木树叶之末，欲坠不坠，则皆聚为圆点，光莹可喜。日光入之，五色俱足，闪烁不定，是乃日之光品著色于水，而非雨露有此五色也。

从该段文字不难看出程大昌之高见：雨露之五色原是日光之“光品”。“光品”或可解为光的品质、本质，或可衍为“固有”。露珠的“五色”来自“光品著色于水”。他的解释已接近于近代光学的结论。对这种分光现象的仔细观察，还有历代炼丹家和本草药物学家。为鉴别上好的水晶以作丹料或药料，水晶分光现象就为道家著作和本草著作屡记不鲜。

北宋真宗朝（998—1022年在位）名儒杨亿（974—1020）在其著《杨文公谈苑》中就菩萨石（天然水晶）记述道：

嘉州峨眉山出菩萨石，人多采得之……日光射之，有五色，如佛顶圆光。

其后，寇宗奭在《本草衍义》（成书于1116年）中也记道：

嘉州峨眉山出菩萨石，形六棱而锐首……日隙照之，有五色，如佛顶圆光。俗谓菩萨光明所感，今亦称放光石。

宋代杜绾的《云林石谱》（成书于1133年）是一本矿物学著作。其中也对菩萨石写道："其色莹洁……映日射之，有五色圆光。其质六棱，或大如枣栗，则光彩微茫。间有小如樱珠，则五色灿然可喜。"

直到明末，方以智（1611—1671）在《物理小识》（初稿于1631年）中又写道：

凡宝石面凸，则光成一条，有数棱则必有一面五色。如峨眉放光石六面也……

英国物理学家牛顿（I. Newton，1643—1722）于1666年以三棱镜作分光实验，得出白光是由七色光组成的结论。孰知其前千余年间，中国人屡屡观察到多棱水晶、露珠、冰珠等物的分光现象，并由此推测到日光的品质就是"五色"的。

七　郑复光及其《镜镜诊痴》

前面叙述中我们多次提及郑复光其人。他做小孔成像实验、做透光镜和冰透镜。正如墨翟及其《墨经》一样，郑复光及其《镜镜诊痴》是清中期的奇人、异书。

郑复光（1780—约1853），字浣香、元甫，安徽歙县人。监生出身。此人真可谓"行万里路，读万卷书"。青少年时，他游扬州，迷恋扬州市上取影灯戏。后游粤、滇、陇、晋、冀、燕。在北京，参观观象台，考察天文仪器。

尤对望远镜感兴趣。闻某藏有其镜，必设法往而探访。读书卷中，对历代技艺之作爱不释手，《墨经》、《考工记》、《梦溪笔谈》等书外，小说笔记中凡有光学文字也要一睹为快，而明末耶稣会士汤若望（A. S. von Bell，1592—1666）著《远镜说》成为他此后研究光学的入门书。其著作取名《镜镜诊痴》，第二个“镜”字是动词；“诊痴”本意为无才学而好夸耀，在此为自谦词。故其书名可译为“光学愚见”或“光学浅说”一类。该书完稿于道光十五年（1835）。

郑复光时代，西方光学知识已传入中国。伽利略望远镜、开普勒式望远镜和格雷戈里（J. Gregory，1636—1675）式望远镜均已传入中国。前二者是折射望远镜，后者是反射望远镜。明末清初，统称它们为“千里镜”，后者又称为“摄光千里镜”。汤若望在明末清初共制造了两具伽利略式望远镜，开普勒式望远镜于清代在广东沿海流传几具。格雷戈里式望远镜是入华教士献给康熙帝的，存于内宫。康乾时期编纂《四库全书》，才将此“摄光千里镜”绘于《皇朝礼器图式》中，读者方知其图像（图7）。光学知识方面，传播最广的便是汤若望著《远镜说》，全书4 500字，绘有凹、凸

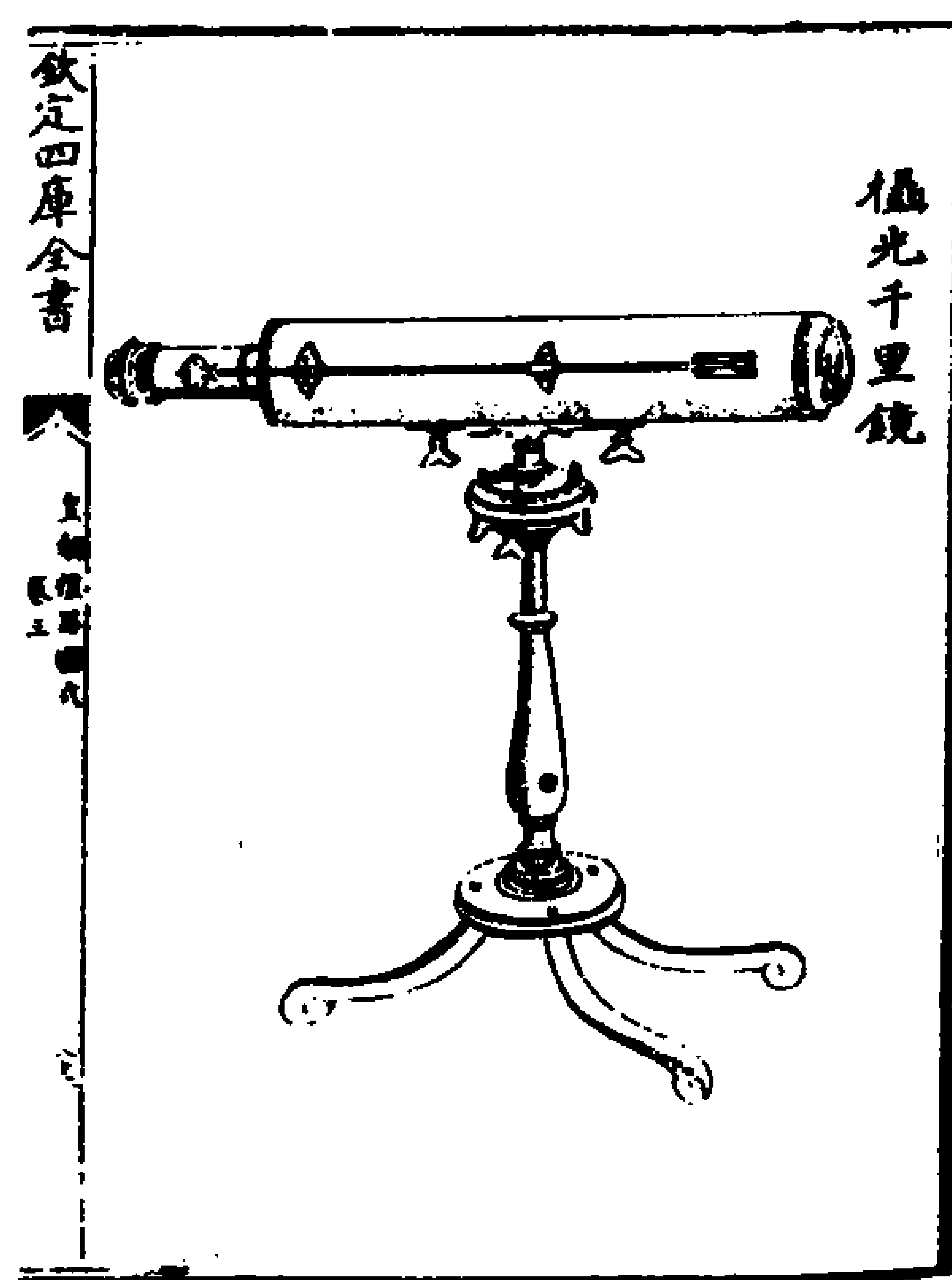


图7　反射望远镜

透镜成像光路图。然而，书中既无焦点、焦距概念，成像光路图也是错误的。该书的成像光路图给郑复光等中国读者以极为新奇感觉，而错误的光路也造成极坏影响。郑复光、邹伯奇等中国的光学家和制镜工艺师不得不自辟理论，摸索制造具有各种放大率的光学器具。

郑复光制造了各类眼镜：平光镜、近视镜、老花镜。又制造了三棱镜、多宝镜、柱镜、万花筒、显微镜、取景镜（照相机）、放字镜（幻灯机）和望远镜。后者包括观象（伽利略式）、窥筒（开普勒式）两种望远镜。他根据四库全书中《皇朝礼器图式》所绘摄光千里镜图，对它的镜头组合、构造及光路作出探讨。

郑复光按照他自己和制镜匠的经验，创造了工匠式的光学理论和镜面成像的原理。他以“透照”、“通气”和“返照”、“含光”区分透镜和反射镜。他在其书《释园》篇中，阐述凹、凸透镜及其组合透镜的光学性质，列出配制各种镜片的参数表。他提出了一些相关的光学概念或术语，如“镜光线”、“顺三限”、“侧三限”、“距显限”等。所谓“镜光线”实为以透镜焦点为顶点通过透镜平面的光锥；“顺三限”包括“顺收限”、“顺展限”和“顺均限”三者，其中“顺收限”即今焦距，适用于凸透镜。凹透镜则以“侧三限”衡量之。“距显限”有像距概念。由于受《远镜说》错误光路图的影响，郑复光所绘成像光路也是错的。但是郑复光是以自己的实践经验为基础，其成像位置及像（虚、实、正、

倒）的相关叙述又都是正确的。

梁启超在其《中国近三百年学术史》中，曾对郑复光作出极高评价，他说：

明末历算学输入……而最为杰出者，则莫如歙县郑浣香之《镜镜诊痴》一书。浣香之书，盖以所自创之光学知识而说明制望远、显微诸镜之法也。……是书稿在道光初年矣。时距鸦片战役前且二十年，欧洲学士未有至中国者，译书更无论，浣香所见西籍仅有明末清初译本之《远镜说》、《仪象志》、《人身说概》等三数种。然其书所言纯属科学精微之理，其体裁组织亦纯为科学的……全书体例，每篇例举公理若干条，难明者则为之解，有异说者则系以论，表象或布算则演以图（全书为图一百二十八——原注）。大抵采用西人旧说旧法者十之二三，自创者十之七八……百年以前之光学书，如此书者，非独中国所仅见，恐在全世界中亦占一位置。浣香所以能为此者，良由其于算学造诣极深，而又好为深沈之思。

八　邹伯奇的光学

邹伯奇（1819—1869），字一谔、特夫，号徵君。广东南海人。平生喜经史、名物制度，好西学而淡泊仕途。咸丰七年（1857）受聘为广州学海堂学长，后又任广雅书院教习。同治三年（1864）入广州府学署，参与测绘地图事。

其平生制造了各种望远镜（图8）和显微镜。虽说他“好覃思而懒著述”，但仍留下不少著作，并且部分书稿被后人辑为《邹徵君遗书》。其中《格术补》和《摄影之器记》为重要的两篇光学著作。

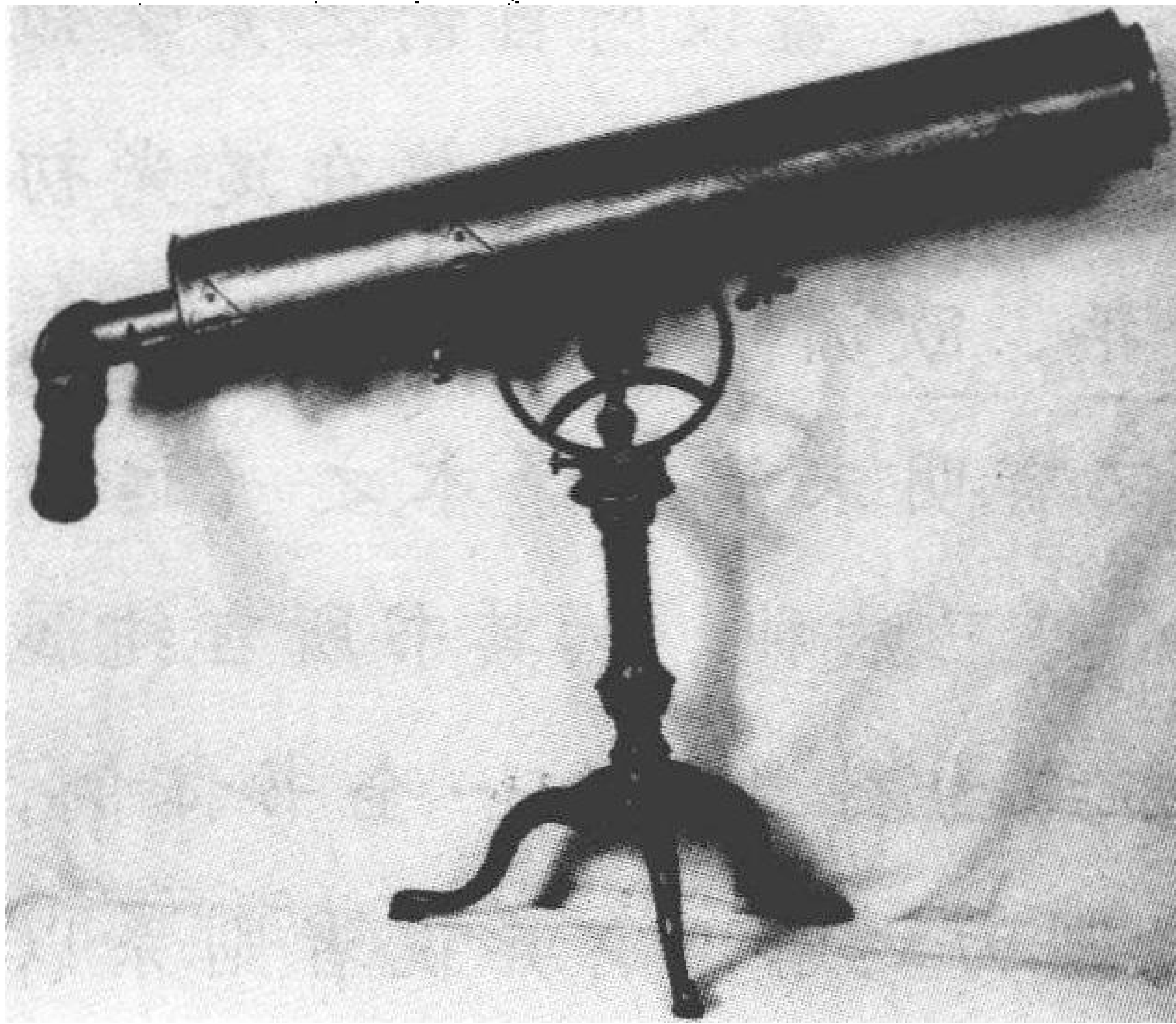


图8　邹伯奇自制“摄光千里镜”（今藏广州博物馆）

《格术补》约成书于道光二十四年（1844）。“格术”二字源自宋代沈括《梦溪笔谈》。邹伯奇借为几何光学的代用词。全书41条，约5 500字，涉及影子生成道理，小孔成像，透镜和透镜组的成像光路及计算公式，眼睛、视觉和矫正方法，四种望远镜（伽利略和开普勒式折射型，格雷戈里和卡塞格林式反射型）的设计、制造、计算公式，如何以透镜组改造目镜的方法，望远镜的渐晕与场境作用，分辨本领及镜筒设计安装方法，单片和双片凸透镜或一凸一凹透镜组成显微镜造法，显微镜各参数之间关系，最后是两道几何光学习题。

《格术补》中，以“聚光限”、“收光限”或“目限”指凸透镜的焦距（设为f）；以“物距镜”指物距（设为u）；以“影距镜”指像距（设为v）；以“影加远之数”指像距离焦点之长度数值。按照该书第十条，可得到透镜成像的物像关系式，如下：

$$\frac{f^2}{u-f}=v-f;\ 或\frac{uf}{u-1}=v;\ 或\frac{uv}{u+v}=f$$

邹伯奇叙述的这些成像关系，不难将它们化为高斯公式，即：

$$\frac{1}{u}+\frac{1}{v}=\frac{1}{f}$$

高斯公式是由德国数学家高斯（C. F. Gauss，1777—1855），于1841年计算而得的。邹伯奇晚高斯3年而独立获得此关系式。

我们引述一条比较简单的文字以示邹伯奇关于透镜组焦距的计算法：

有两凸相叠，求聚光法：

以两凸聚光限相乘，两凸聚光限相并除之，得两凸相叠聚光限；

若先有相叠聚光限，与一凸聚光限相乘，与一凸聚光限相减为法除之，得余一凸聚光限。

设两凸透镜之聚光限（焦距）分别为f_1，f_2，两者组合后焦距为f，按其所述，则有：

$$f=\frac{f_1f_2}{f_1+f_2},\ 而f_2=\frac{ff_1}{f_1-f}$$

这个公式也是完全正确的。

限于时间，我们不能一一解说《格术补》中光学内容。我们要指出的是，在《格术补》成书之前，有关透镜成像公式，西方来华教士未曾作任何相关知识的传播。张福僖和英国教士艾约瑟（Joseph Edkins，1823—1905）合译《光

论》一书，成书于1853年，晚于《格术补》约10年，且该书丝毫未涉透镜成像及望远镜原理等内容。

清代名儒、历算家陈澧（1810—1882）为《格术补》刊版作序，云：

古之算家有所谓“格术”，后世亡之，而吾友邹特夫徵君补之也。“格术”之名见《梦溪笔谈》……徵君得《笔谈》之说，观日月之光影，推求数理，穷极微妙，而知西洋制镜之法，皆出于此。乃为书一卷，以补古算家之术。……此今世算家之奇书也。

梁启超在《中国近三百年学术史》中又称颂邹伯奇“以算学释物理，自特夫始。”

邹伯奇是以数学语言阐释物理（尤其是光学）问题的中国近代史上第一人。

邹伯奇的另一项光学成就是：自制照相机，自备显影液与定影液，以玻璃板摄影术成功拍照人物肖像。其成就居当时国际同行先进之列。其著作《摄影之器记》脱稿于道光二十四年（1844），这是一篇专门叙述照相机制造的著作。此后10年间，即1854年之前，他成功地解决了在光滑的玻璃板上稳定地涂抹银盐溶液的技术，从而拍下了世界上最早的玻璃板人物像[①]（图9）。同治三年（1864），应广

---

① 笔者在《中国物理学史大系·光学史》、《中国物理学史·古代物理学史》和《中国科学技术史·物理学卷》等著作中，以邹伯奇一张自拍照后之题词，推测他成功玻璃板摄影术在1863—1866年间，似不确。因为不能肯定这张照片就是他拍照的第一张。

东巡抚郭嵩焘之请，测绘广东沿海地图，此期间他以摄影术测绘了“浔岗洲图”（图10）、“桑园围全图”等村落地图。



图9　邹伯奇自拍照（藏广州博物馆）

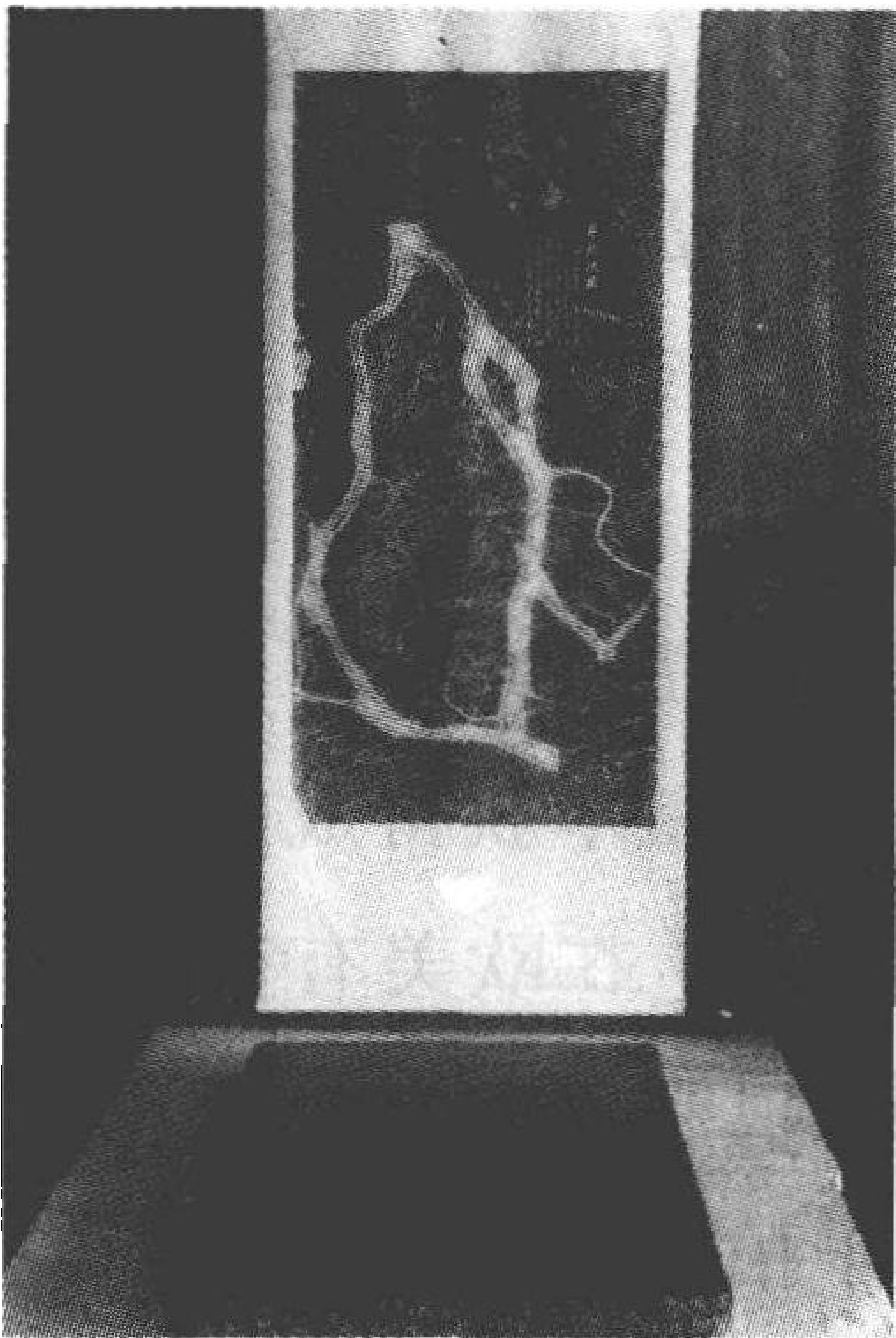


图10　邹伯奇摄影地图：石刻“浔岗洲”（藏广州博物馆）

摄影术的初期进展是极有意思的。早在1727年，舒尔茨（J. H. Schulze，1687—1744）发现银盐溶液在阳光下变黑。而此后80年内，人们未曾将这个发现与摄影结合在一起，化学与光学各走各的路。1800年，韦奇伍德（T. Wedgwood，1771—1805）试图把暗箱中的像固定在涂有硝酸银溶液的白纸或白皮上，但不明感光时间多少，照片变成黑漆一片。1816年，尼普斯（J. N. Niepce，1765—1833）用氯化银感光纸取影。但从负片翻成正片过程中失败。10年之后，他以长达8个小时的感光时间拍下世界上第一张沥青板底片。纵使后来，他将技术改进到只需2至3

小时感光，对于人物拍照而言，仍不适用。谁也不能纹丝不动地坐于阳光下达 2 小时之久。1837 年，法国物理学家达盖尔（L. J. M. Daguerre，1787—1851）以银板照相法在 20 至 30 分钟内照相成功，并于 1839 年 8 月 19 日将其操作方法公诸于世。这一天，便是银板照相法的诞生之日。

银板照相过于昂贵的成本使人望而却步。直到 1847 年才有玻璃板照相术问世。起初，人们不知道如何在玻璃板上固定住银盐溶液。当人们知道蛋清是它的优良载体，玻璃板照相术获得成功。但是，玻璃板与蛋清结合的照相术成功后，在欧美有很长一段时间未用其拍照人物肖像，而是用以制作风景幻灯片。正是此时，邹伯奇却使之成功地用于拍摄人物像。他理应享有这个优先权的荣誉。

笔者作出如下推测：邹伯奇抑或在时间上较早发现蛋清可以使硝酸银溶液粘着在玻璃板上；抑或其加工蛋清的工艺尤其耐心：在蛋清内加入少许食盐，用筷箸打匀，刮去浮沫，再打，将丝缕打化，时间不宜过短或速成，再将蛋清倒入盆中澄之。此后，这蛋清才能作为硝酸银溶液在玻璃板上的载体。当玻璃板一面均匀挂上此蛋清后，它就可以在这面上均匀地粘附薄层硝酸银，这就制成了玻璃板负片。还有一个原因，或许邹伯奇用的显影与定影的化学药品是中西结合的。

在 1844 至 1854 年间，邹伯奇成功拍摄人物肖像。此后十年，即 1863—1867 年间，英国医生德贞（J. H. Duolgeon，1837—1901）在北京崇文门开照相馆，1873 年编译《脱影

奇观》一书，西方照相术开始传入华夏。

用摄影法测绘地图，是法国人洛斯达（Aime Laussedat，1819—1906）于1851年开始实验的，1861年他完成了凡尔赛附近一个小村庄的测绘工作。邹伯奇于1844年在他的《摄影之器记》一文中提出以摄影“画地图之法”，于1864年以摄影法实测了浔岗、桑园等村落图。邹伯奇的设想比洛斯达早几年。

第三章

声学史

言语的产生与发展，音乐的萌芽与繁荣，乐器的制造及其种类的增多，都是声学这门学科得以产生的重要源泉。

在古代科学史上，声学是物理学中最为发达、内容最为丰富、理论最为完备的学科。尤其在音乐声学方面，确定音高与振动体长度之间的数量关系，是人类在自然现象中最早发现的物理规律。古代中国人不仅确定了八度内各个音程的相对比值，而且总结出了它们之间的数量关系；明朝王子朱载堉在世界上首创十二等程律（Twelve-tone equal temperament）。在管口校正方面，也有众多非凡成就。

声学发展具有相关文化背景：第一，丰富的音乐实践奠定了它的发展基础。例如，在河南舞阳县贾湖村发掘出早在公元前5000年以前的7孔骨笛多支，可吹奏六声或七声音阶（图11）；在湖北随县出土曾侯乙钟65件，铸造于楚惠王十六年（前433），其音域达五个八度以上，十二半音俱全，可旋宫转调（图12）。第二，音乐文化的交流促进了声学的发展。公元前10世纪，周穆王率乐队西游，抵达

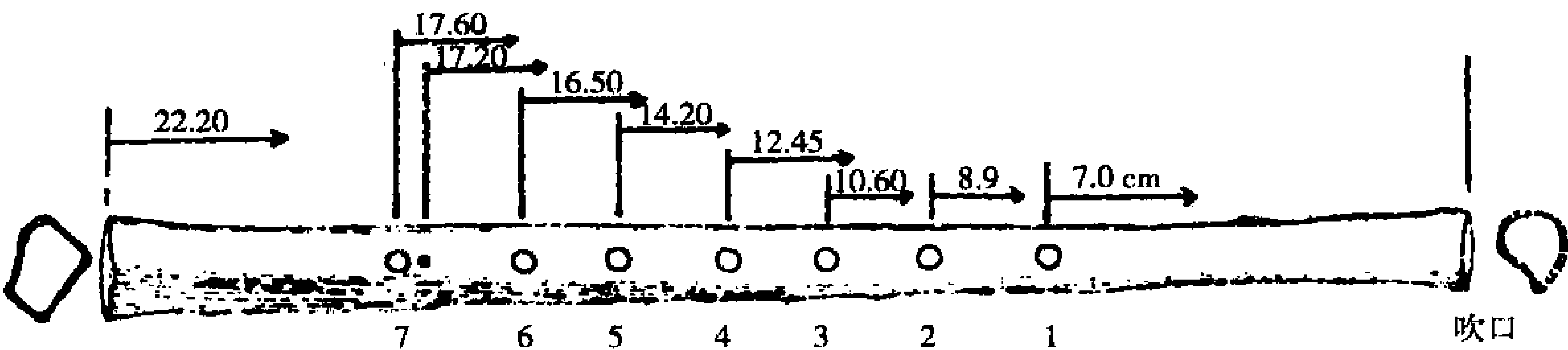


图11　贾湖骨笛及其开孔位置

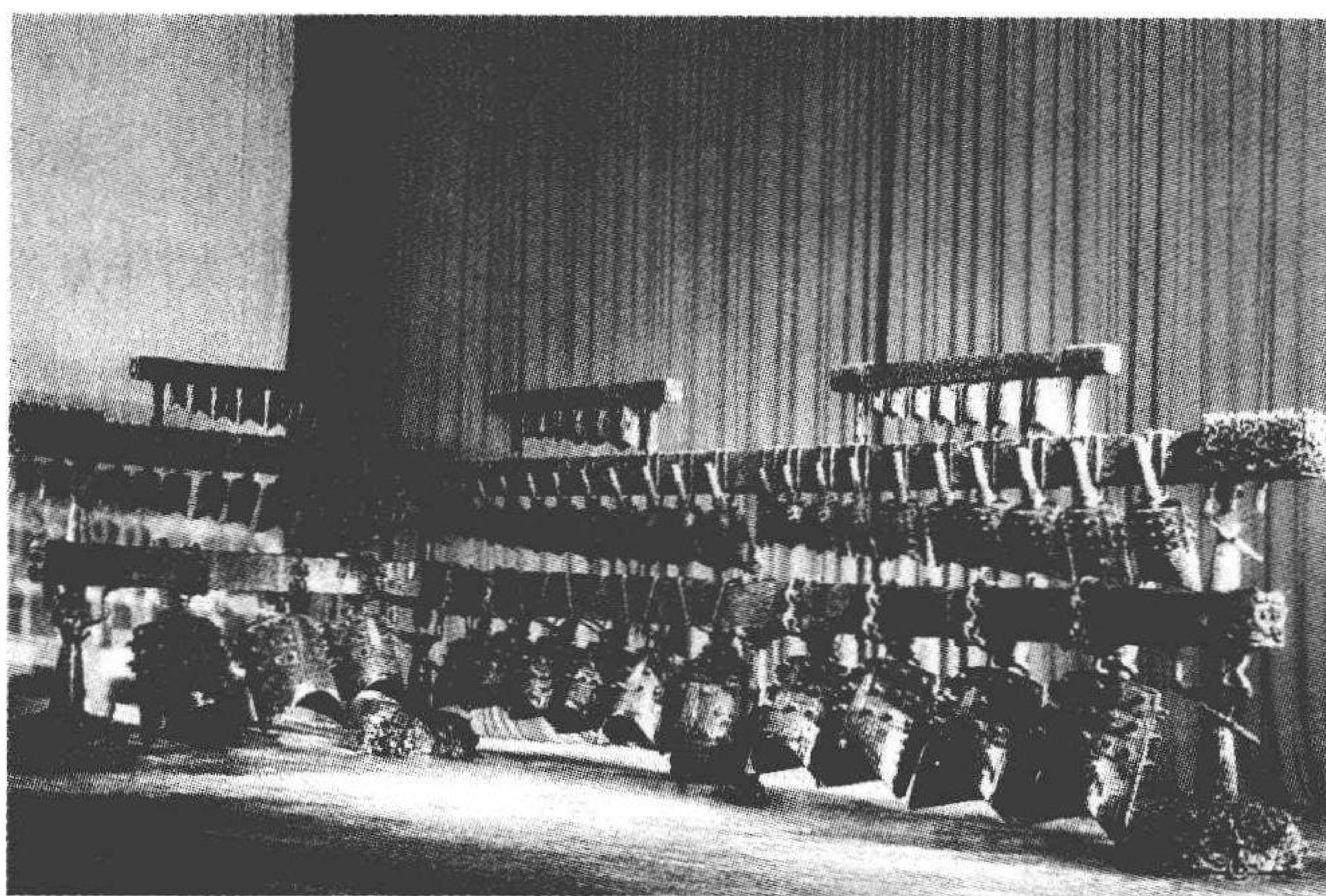


图 12　曾侯乙编钟

今阿富汗东北、里海近处黑湖畔（Karakul）(《穆天子传》)。边远地区白狄族流入中原，靠歌舞谋生（《史记·货殖列传》)。汉武帝以宗室女远嫁乌孙国王，携乐队随嫁，乌孙族又于公元前 161 年西迁至伊塞克湖畔（在今哈萨克斯坦)。而公元2 世纪，西亚、印度乐器传入中国。今日舞台上所见竖空篌，原是汉初由印度传入的巴比伦文化的产物。第三，乐律为国家行政和法定教育的组成部分。国家设立“太司乐”、“太常寺”掌管以歌舞宴飨祭祀、宫中喜庆。其中“太常丞”、“太常卿”相当今日文化部长，其下属一个八九品的“协律郎”（相当于今日游街走巷的钢琴调律工）都可以参与朝政。这在西方简直是难以想象的事。不仅如此，有关乐律的历史也是历代正史中不可或缺的篇章。至于教育，如周朝有“六艺”：礼、乐、射、御、书、数；孔子订“六经”：《礼》、《乐》、《诗》、《书》、《易》、《春秋》。“乐”成

为仕宦知识含量的判定标准之一。值得注意的是，历代有许多帝王将相不仅酷爱音乐，其本人也是个音乐家。如唐玄宗李隆基有一对灵敏的耳朵，政务之暇，指挥太常乐工几百人歌唱，“有一声误，玄宗必觉而正之”（《旧唐书·音乐志》）。他若不步入金銮为帝，必定是唐代伟大的音乐指挥家。若如是，抑无“开元盛世”和“天宝之乱”。

一　振动和波的概念由来

“振动”一词源自《考工记·凫氏》。在记述青铜编钟的设计、铸造和调音时，它说：“薄厚之所振动，清浊之所由出。”

它道出钟壁厚薄与振动、发声高低三者的关系。

宋代文学家欧阳修（1007—1072）在《六一笔记》中记述了一个类似今日相声艺术的“发声诘难”，颇有趣味。他写道：

甲：铸铜为钟，削木为梃，叩钟则铿然而鸣。然声在木乎，在铜乎？

乙：以梃叩垣墙则不鸣声，叩钟则鸣。是声在铜。

甲：以梃叩积钱则不鸣，果在铜乎？

乙：钱积实，钟虚中。是声在虚器中。

甲：以木若泥为钟，则无声。声果在虚器之中乎？

今天，有中学物理水平的人，不难代乙回答甲的疑难。

唐代一些音乐著作不仅述及振动，还述及“声源”、“气振”等与声音传播有关的术语。波或声波一词早见之于汉代。西汉以占卜闻名的灾变家最早提出空气波与水波相类似。他们认为，人的行动会感悟上天，是因为有气波传达。东汉王充批判他们的言论，肯定水波与空气波类似，但“不能至天”，范围有限（《论衡·变虚篇》）。明代宋应星（1587—?）在《论气·气声》中又一次说：

以石投水，水面迎石之位一拳而止，而其文浪以次展开，至纵横寻丈而犹未歇。其荡气也，亦犹是焉，特微妙而不得闻也。

然而，声波是纵波（疏密波），水波是横波。古代人对此不能分辨，当可理解。

古代人将“声”与“音”是分开的。声，广义词，一般声音；音，是声音之一，专指音乐，或语言学上声韵。初，声学繁体“聲”，从耳。耳朵听见者为声。另一声字“謦”，从言，口中说出为声。“謦”字未流存下来。耳所听者，除出于口喉之声外，余则为“響”，有声则有响。东汉许慎《说文解字》中，将口说“宫商”为声，将乐器演奏“宫商”为“音”。《礼记·乐记》则以为，“声生变，变成方，谓之音”。即高低节奏有变化的声，才谓“音”。此乃音乐之音了。

乐音与噪声的区别，古人也有定义。从汉代始，人们将噪声定义为“群呼烦扰耳也”（《玉篇》）。这定义是科学的。近几十年，才有以声压定义（如多少分贝为扰民之声）

的噪声概念。

“声学”一词初见之沈括《梦溪笔谈》。他在记述共振、音调、和声等现象时，指出“此声学至要妙处也。今人不知此理，故不能极天地至和之声”。

在西方，18世纪初，法国物理学家索维尔（J. Sauveur，1653—1716）建议设立一门新学科，将音乐包括在内，名之曰 acoustigue（英文 acoustics），中译“声学”，今音乐界常译为“音响学”。

谈到“声波”与“振动”概念时必须澄清一个重要观念，即无论东西方，在伽利略之前，没有“频率”（单位时间内振动次数）的概念。古代人衡量乐音的高低是以振动体（弦线）的长度为标准的。古希腊人曾以铁锤的大小衡量它也是错误的。频率概念的引出，要精密到有“秒”的计时器，且振动体的振动可以计数。伽利略是以血脉的跳动作为时间单位，以单摆摆动为计算对象，这才引出“频率”的概念。近半个世纪来，某些科学史家，不明底里，以为古希腊以频率定乐音高低，比中国人以弦长定乐音高明。如此断论者，多非物理学出身者也。

二　共振与混响

古代人发现并记载了大量的共振现象：弦共振、弦管共振、钟磬共振等。《庄子·杂篇·徐无鬼》曰：

为之调瑟，废（置）于一堂，废于一室。鼓宫宫动，鼓角角动，音律同矣。夫改调一弦，于五音无当也，鼓之，二十五弦皆动。

这就是在厅堂和在室内分别置相同瑟的共振实验。后一句说的是泛音共振现象。《庄子》最早记下了弦线共振现象，并解释了共振成因："音律同矣"。

唐代韦询在《刘宾客嘉话录》中记述了一个消除共振的故事：洛阳某僧因房中磬日夜自鸣，惧而成疾。他求术士解除而不得。某日，宫内太乐令曹绍夔得悉此事，笑对僧人说："明日设盛馔，余当为除之。"次日酒足饭饱之后，曹从怀中出利锉，锉磬边数处而去，自鸣声遂绝。僧喜并问曹所以然。曹答："此磬与寺内钟律合，故击彼应此。"僧疾因而愈。这个故事被许多典籍辗转传抄。

固体（如地表面）传声过程中，如遇有空穴，即在穴内产生混响。利用这种固体传声的空穴效应，就可以造成"地听器"。例如在地面埋一陶瓮，人耳贴瓮而听，可探知远处敌军人马声。这个陶瓮成为最早的原始地听器。它是战国时期墨翟及其弟子最早发明并应用的军事装备。后来历代兵家也以此作为战场必需设备。行军中，将士们将空箭袋作枕，闻敌军动静，也是这个道理。蒙学课本《千家诗》中有宋张耒（1054—1114，字文潜）《夏日》诗：

长夏村墟风日清，檐牙燕雀已生成。

蝶衣晒粉花枝干，蛛网添丝屋角晴。

落落疏帘邀月影，嘈嘈虚枕纳溪声。

久判两鬓如霜雪，直欲樵渔过此生。

“嘈嘈虚枕纳溪声”就是对空穴效应的描述。沈括将这种效应正确地解释为“虚能纳声”。固体、液体传声比空气传声阻力小，而速度快。因此在湖泊中可以噪声捕鱼。几只船围成圈，同时以木棍敲打船舷（古人称此谓“鸣根”），不久，鱼即翻漂水面。从汉迄清，渔人无不知晓此捕鱼法，历代文人亦和诗以颂。唐代皮日休（？—883）《鸣根》诗写道：

尽日平湖上，鸣根乃动桨。

丁丁入波心，澄澈和清响。

鹭听独寂寞，鱼惊昧来往。

尽水无所逃，川中有钓党。

鉴此噪声捕鱼法，令鱼种灭绝。20世纪50年代初，我国已明令禁止。

然而，另一种捕鱼法值得提倡。利用去节竹筒，插入海底，耳贴竹筒一端，可闻水下鱼群活动声。尤以四五月间，黄花鱼汎到来之时，鱼群活动声有如“水下雷声”。至晚明代，江浙沿海渔民，以此方法捕鱼。明代田汝成（嘉靖五年，即1526年进士）在《西湖游览志余》中写道：

杭人最重江鱼，鱼首有白石二枚，又名石首鱼。每岁盛夏，来自海洋，绵亘数里，其声如雷，若有神物驱押之者。渔人每以竹筒探深水底，闻其声，乃下网截流之。

“石首鱼”即今日之黄花鱼。竹筒探鱼，或可称为古代“声呐”。

三　青铜钟

中国是最早铸造青铜钟的文明古国。传统上，人们将钟分为铃、钟、镈、铙、钲、铎等名称。这是据其大小、用途而命名的。西方人统统称其为 Bell（钟）。

在河南汤阴县白营村出土了公元前 30 世纪的龙山文化时期的陶铃。在山西襄汾县陶寺村出土了公元前 25 至前 21 世纪最早的铜铃。商代铜铃（如动物装饰铃、玩具铃、军铃、乐铃等）也有大量出土。在安阳殷墟前后几次出土了编钟，它们具有一定音阶关系，可用以演奏音乐。西周时期编钟大发展，春秋至战国初，铸造编钟的技术达到了顶峰。曾侯乙编钟就是战国初的作品。

从考古发掘的钟来看，先秦时期，中国的青铜钟绝大部分是扁圆形体，即其横截面近似为椭圆，圆形钟极为罕见。然而，在四川广汉三星堆曾出土属于约公元前 13 世纪的圆形钟：铜贝和石榴花形钟（图 13、14）。可以说，椭圆

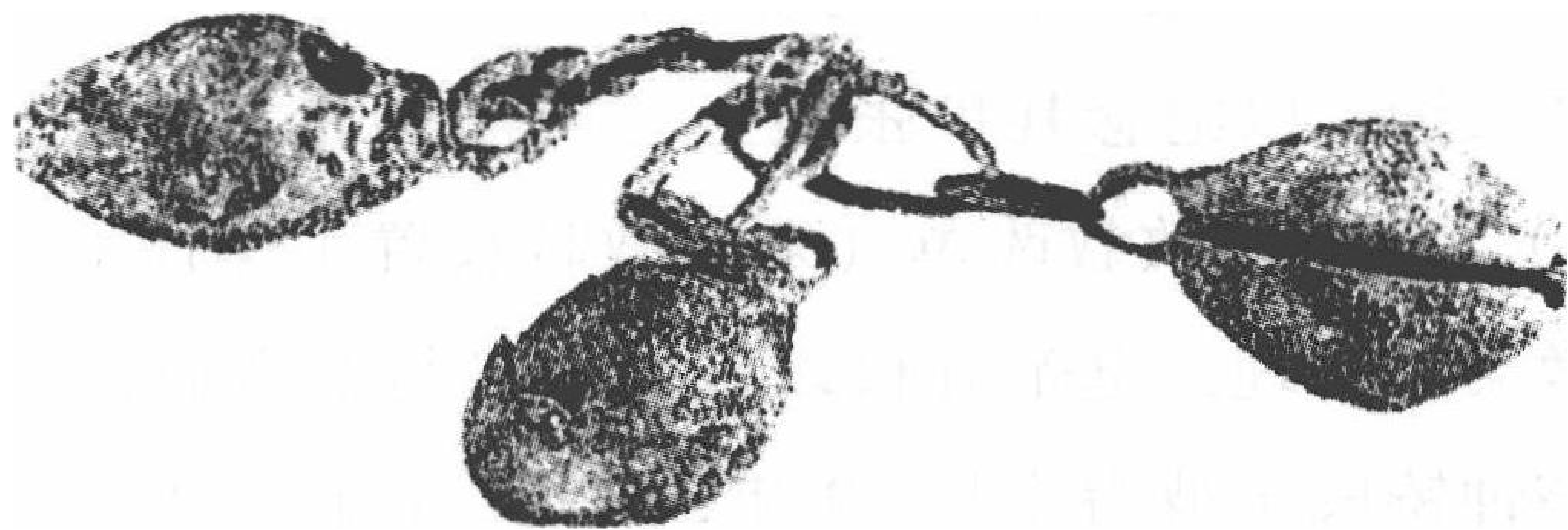


图 13　三星堆出土闭合青铜钟——铜贝，长 5cm，宽 3.5cm

形钟是中国传统，圆形钟是西方传统。西方音乐学家和科学史家说，钟的形态起源于植物的花果。石榴是汉代从西域传入的。难道三星堆的古铜钟是巴比伦文化向东传播的产物（向西传播影响到古希腊），抑或成都平原上早有石榴这种植物？

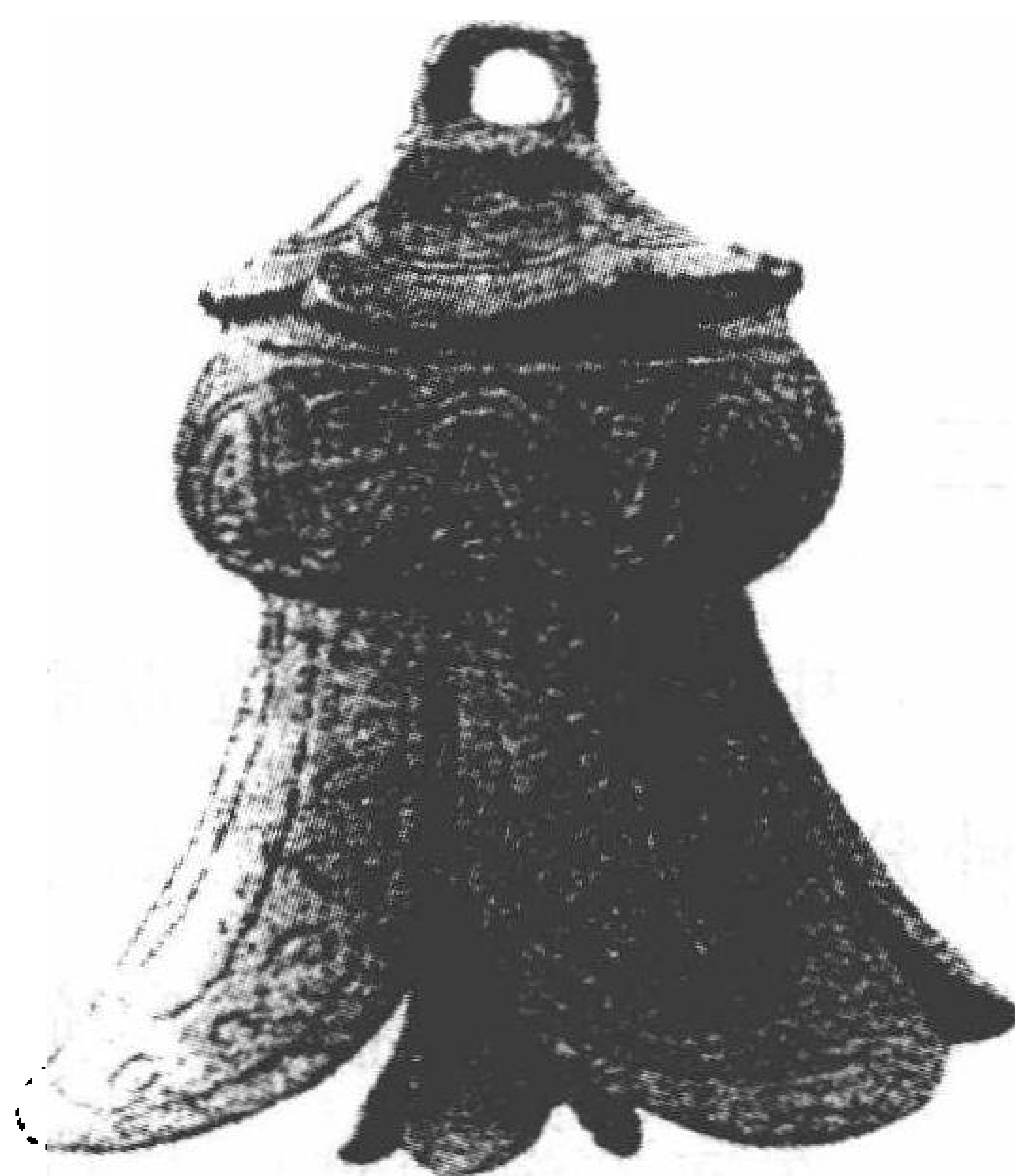


图 14 三星堆出土石榴花形青铜钟

一般地说，圆形钟是随佛教而传入中国的。秦汉以降，梵钟、朝钟多为圆形。现藏北京大钟寺的大钟铸于明永乐年间（1403—1424），重达 46 吨（一说 43.5 吨），高 5.9 米，口外径 3.3 米，钟壁厚 0.4 米。它是世界上现存的最古、最完整、可敲击的大钟。据说，该钟是明永乐帝夺位事成后命其军师僧人姚广孝（1335—1418）监造的。明代宋应星《天工开物》中还绘有铸造如此大钟的工艺流程图。就笔者所知，目前世界上大钟有如下几种：

17 世纪末，俄国沙皇彼得一世（1682—1725 年在位）下令铸大钟，以纪念其扩张领土〔反瑞典北方战争、俄土（耳其）战争〕、政教改革（东正教教长置于皇权下，教务由宗教会议管理，皇帝有权以敲钟直接与上帝通话）的功绩。该钟铸成于彼得卒后 10 年，即 1734 年（清雍正十二年）。据传钟重 202 吨，高约 6 米。其钟舌有两条粗绳，每

条绳25个壮汉才能拉动。3年后，钟体压断了悬挂支柱，摔落地上，半身陷入土中。其中一叶碎片2米高、11吨重。1836年，即掉落摔碎后百年，又从地上吊起，摆放在克里姆林宫，成为一口“死钟”供人欣赏。

据说，19世纪时缅甸曾铸造一口80吨重的梵钟。此钟是否尚存、当时为何铸造、摆放在哪，详情不明。

19世纪，欧洲圣保罗大教堂的大保罗钟重16.67吨，伦敦议院塔钟重13.5吨。1922年美国铸造的洛克菲勒教堂（在芝加哥大学）钟重18.25吨。

钟是古代“八音”乐器之一。至少在佛教传入中国之前，中国人大概未有以钟事神或借钟声与“神灵”、“上帝”通话的观念。除了作为乐器之外，它是古代中国统治者权力的象征。“八音”是古代最早的乐器分类法，并非音调或音高。这八音如下：

金：以青铜铸造的钟、镈、铙、铎一类打击乐器，属于壳振动；

石：以玉石制作的磬一类打击乐器，属于板振动；

土：以陶土制作的埙一类吹奏乐器，属于气振动；

革：以皮革制作鼓一类打击乐器，属于膜振动；

丝：以丝线发声的琴、瑟、筝、筑一类弹拨乐器，属于弦振动；

木：以木制作的柷、敔（类似后来的木鱼）类打击乐器，属于壳振动（近代木琴等打击乐器属于板振动）；

匏：以植物匏制作并有簧的吹奏乐器，如笙、竽类，

属簧振动（在物理学上以细杆振动数学处理之）；

竹：以竹木制作管乐器（也有以青铜铸造），如箫、管、篪、笛，属气柱振动。

“八音”的制作、开孔、调音、校正、演奏方式等，在历代文献中多有记述，其中也饱含物理学知识，甚而如开孔与调音都包含一定数量关系。它们是古代声学知识尤为丰富的原因之一。

四　青铜乐钟的形状与结构

在中国历史上，乐钟总是成组编挂在一起，且有一定音阶关系，连同其敲钟设置，统称为编钟。中国传统编钟与欧洲传统完全不同（图15、16）。在外形上，中国编钟为扁圆形（椭圆截面），欧洲钟为圆形（圆形截面），其他结构如下页表所示。

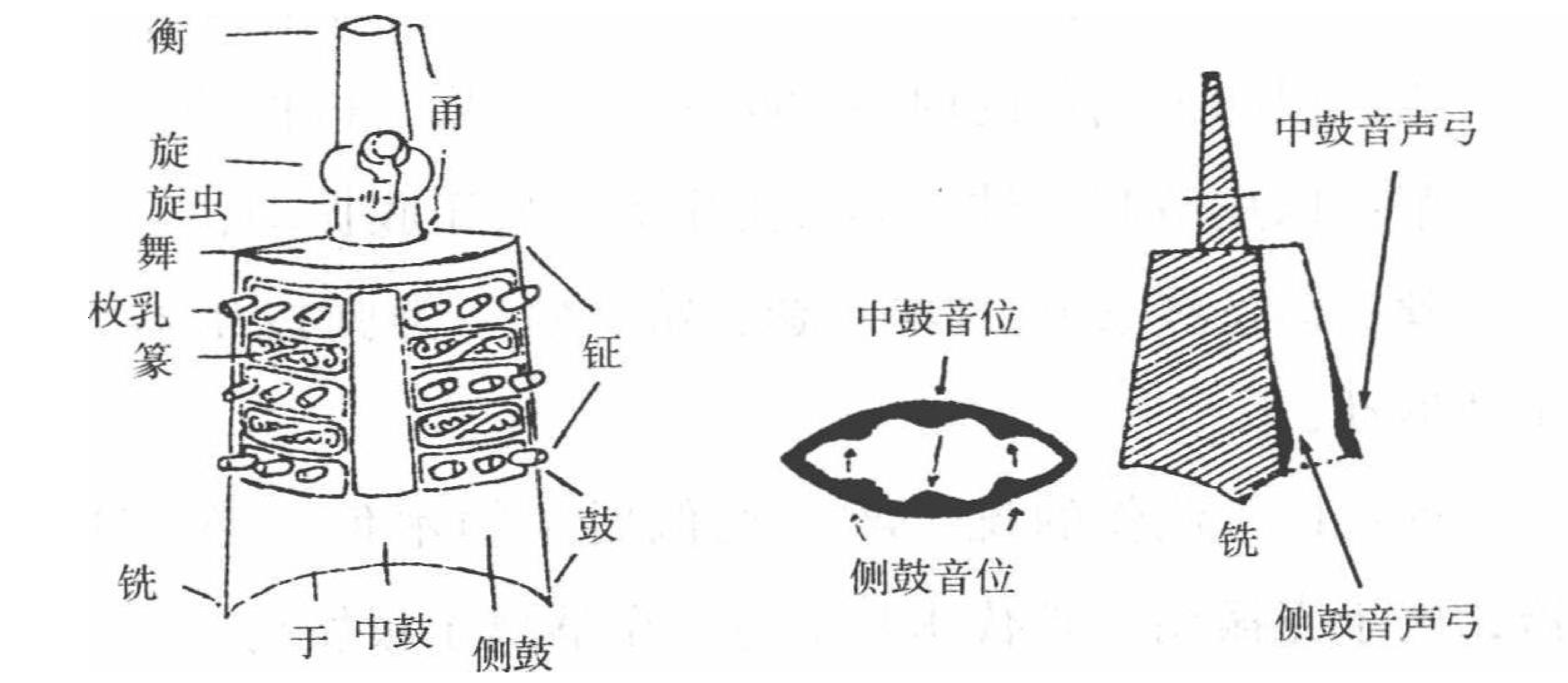


图15　中国编钟各部分名称（左）及其声弓结构（右）

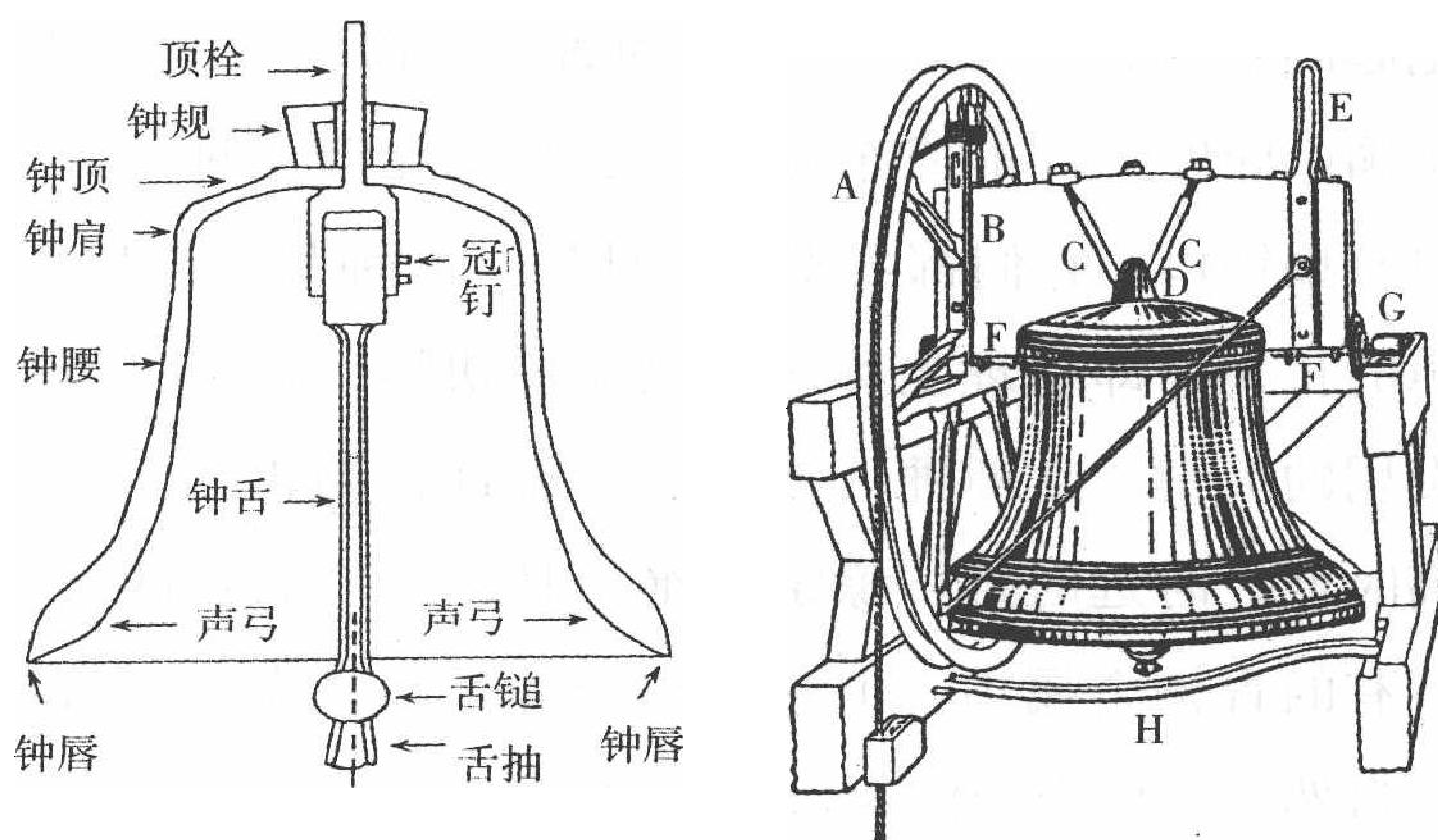


图 16　欧洲圆钟各部分名称（左）及其悬挂敲击装置（右）
右图 A：绳轮；B：钟架头；C：栓绳；D：现代型钟顶轴；E：支柱

中西钟结构比较表

中国传统	欧洲传统
“扁如合瓦”，椭圆截面	圆球外形，圆截面
外表有枚乳、图案、文字	外表光滑
钟肩为椭圆平面	钟肩为球冠形
无钟舌，外击打	有钟舌，内击打；或加上机械装置
钟口：曲于（钟），平于（镈）	钟口为平于（一般地）
声弓：竖条形声弓（一般地）	整齐划一的声弓
悬挂：牢固不动	摇摆、晃动
固定音高，成音阶结构	无固定音高（一般地）
嗡声短、衰减快	嗡声长、衰减缓慢
调音：磨锉内壁，使之成条形声弓	不　详

将图 15、16 与上表对照，就不难明白其中差异。要再说明的是，欧洲钟的敲击及其摇摆之状，可从电影《巴黎圣母院》钟楼怪人卡西莫多敲钟见其一斑。以机械敲击，或以转轮拉动钟舌，或以轮驱动钟体摇摆而碰撞钟舌。19

世纪起的钟琴，以机械装置拉动钟舌，敲击钟体。再者，在中国、印度、日本或东南亚，还有莲花瓣型钟口，有收缩口唇型钟口，它们都为梵钟、朝钟。敲钟都会有嗡嗡声。嗡声的长短，即物理上称之为衰减的快慢，是钟可否作为演奏用的关键。欧洲钟（或所有圆形钟）敲击后，其嗡声时高时低、时远时近，缭绕不绝于耳，人们欣赏的正是这种特有的青铜金属声，但它对演奏音乐却是失败的致命因素。自然，它们难于作为乐器使用。

至于调钟或对钟调律，19 世纪以前，欧洲有否调钟律一说，或者其间失传了，至今不得而知。1890 年前后，荷兰、比利时有极少数商行能制造并调谐乐钟，此后，乐钟（尤其钟琴）始流行欧洲。1922 年传入美国，在纽约市里弗赛德（Riverside）教堂，芝加哥大学的洛克菲勒教堂铸造了由 64 个钟铃组成的大钟琴（图 17），但似乎从未用它演奏过。

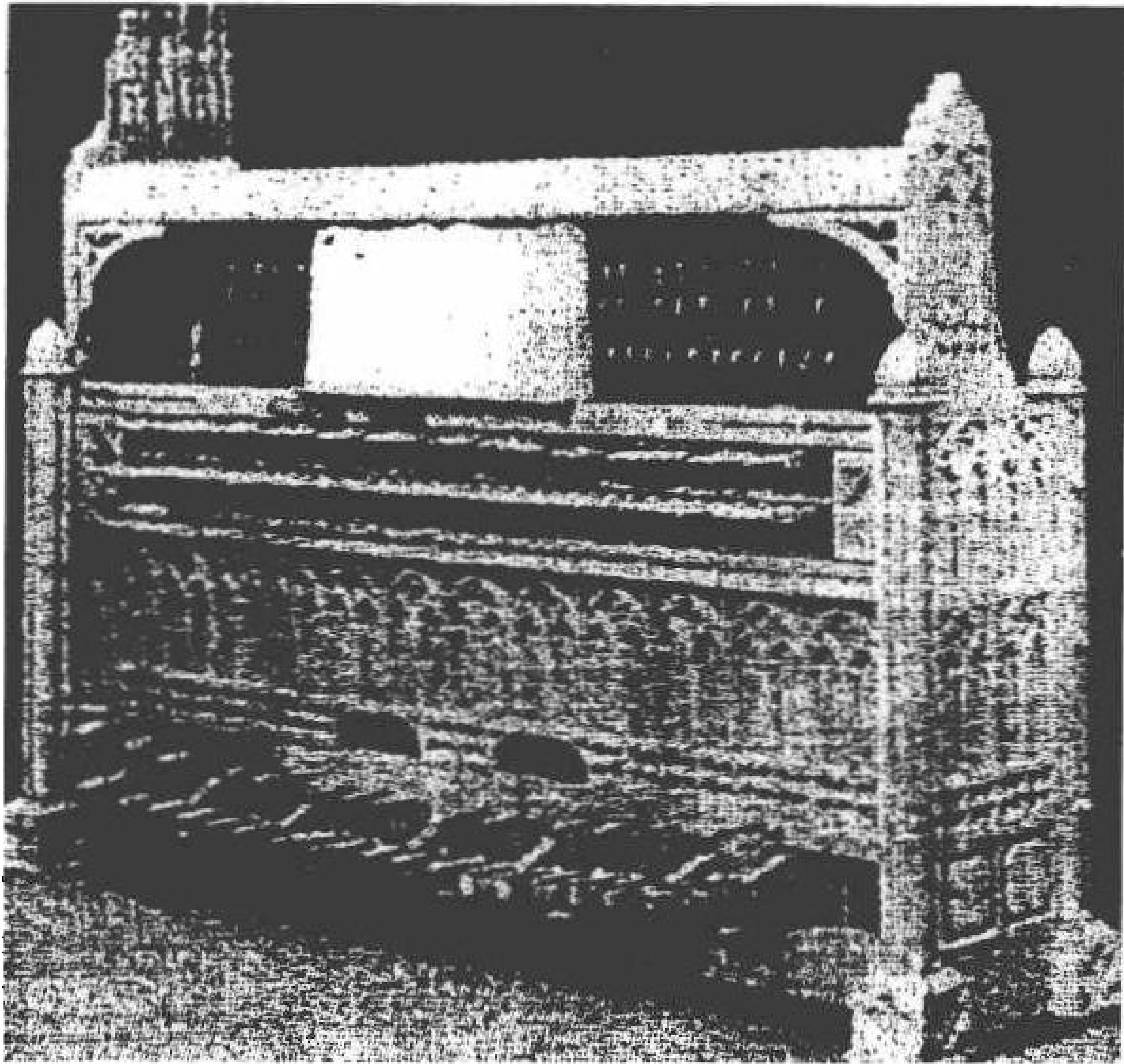


图 17　西方的钟琴

五　编钟振动特性及双音钟

图 18、19 分别描绘了圆形钟和椭圆形钟的振动状态。

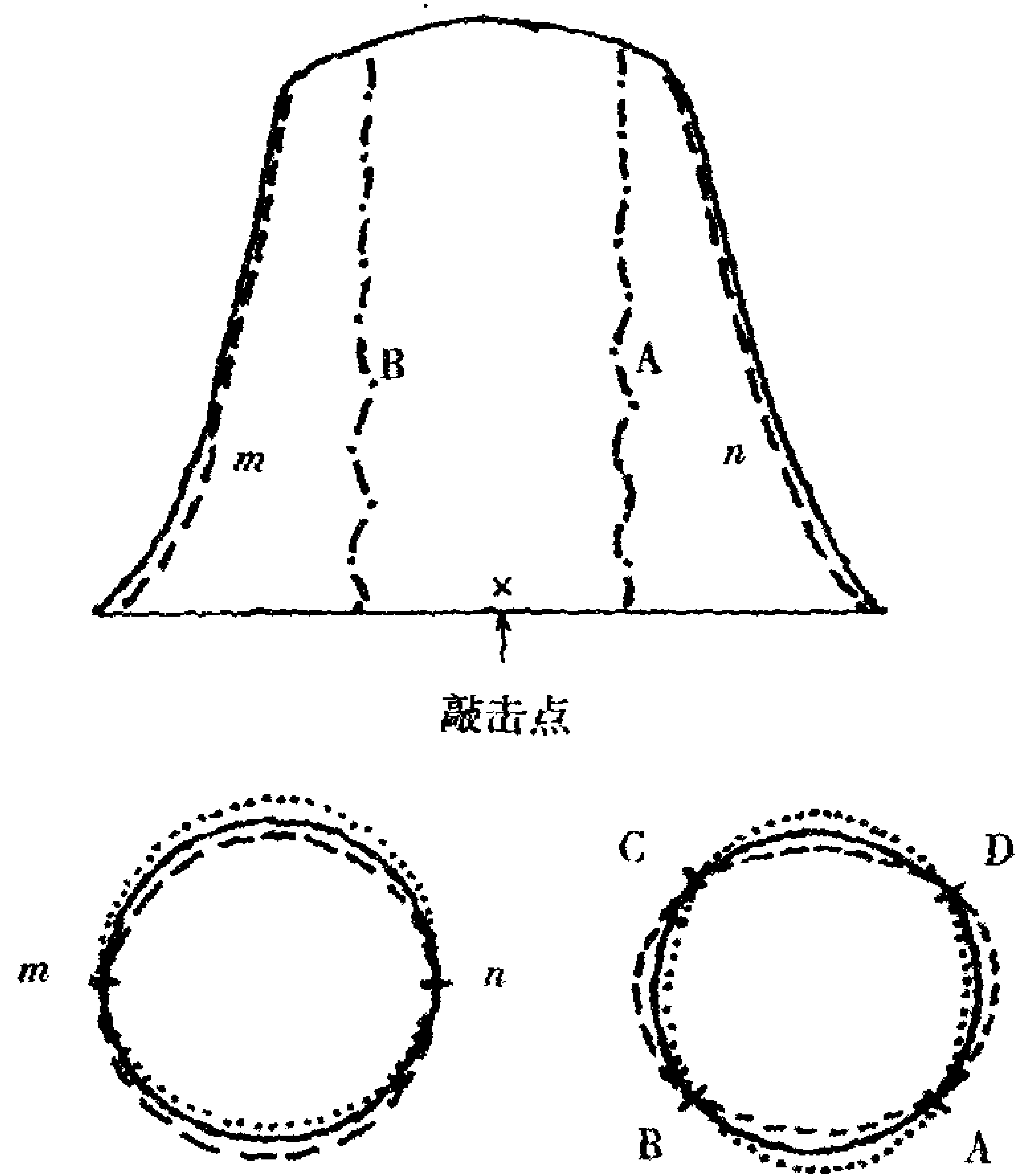


图 18　圆形钟的振动模态

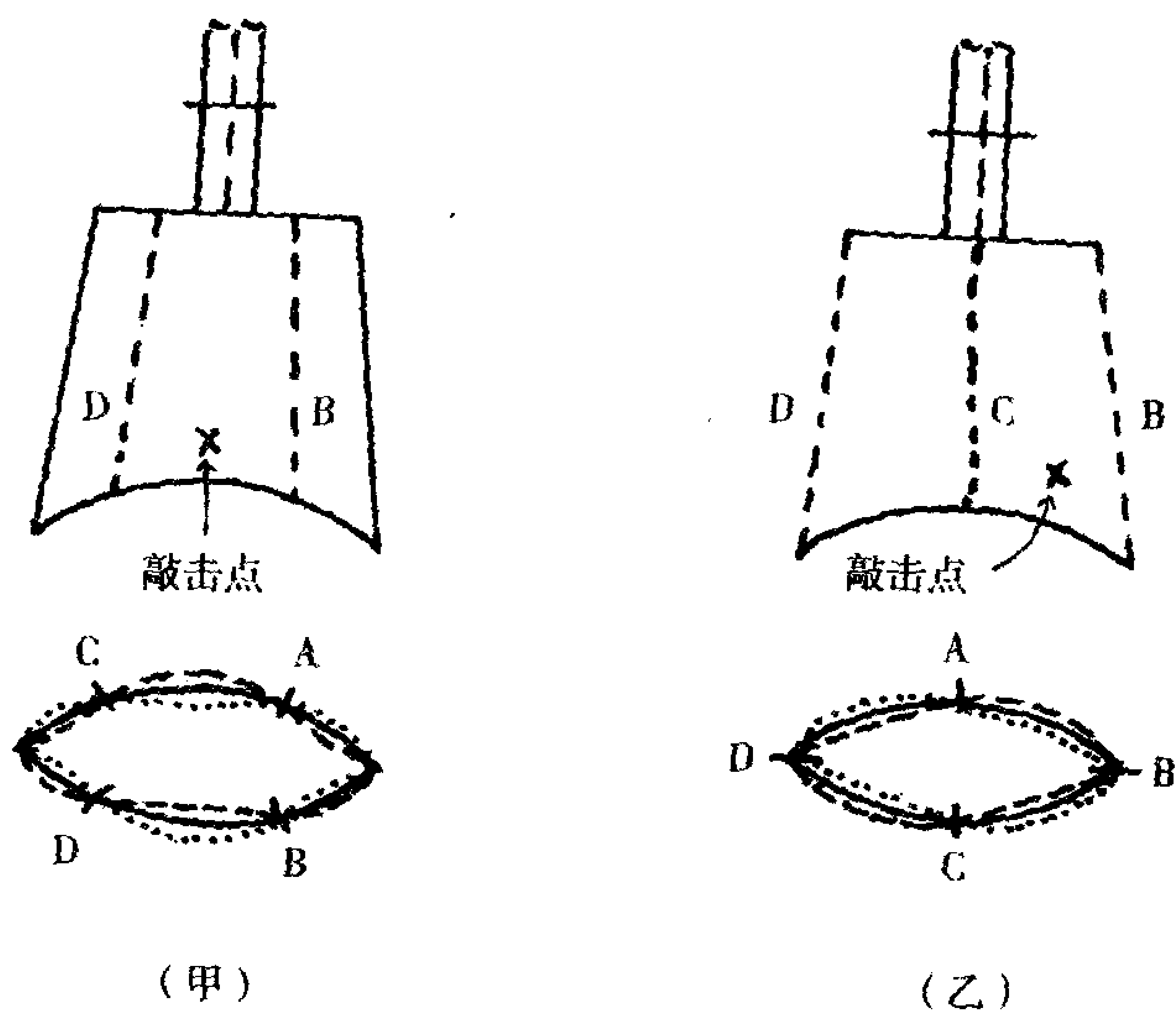


图 19　中国编钟的四节线振动模态

圆钟（图 18）敲击任一点，其振动状态相同。其中，两节线的振动发嗡声，长久不衰；4 节线的振动发出基音。节线数总是偶数且为对称。这种钟不适宜作乐钟演奏用。它的物理特性如图 20 所示。

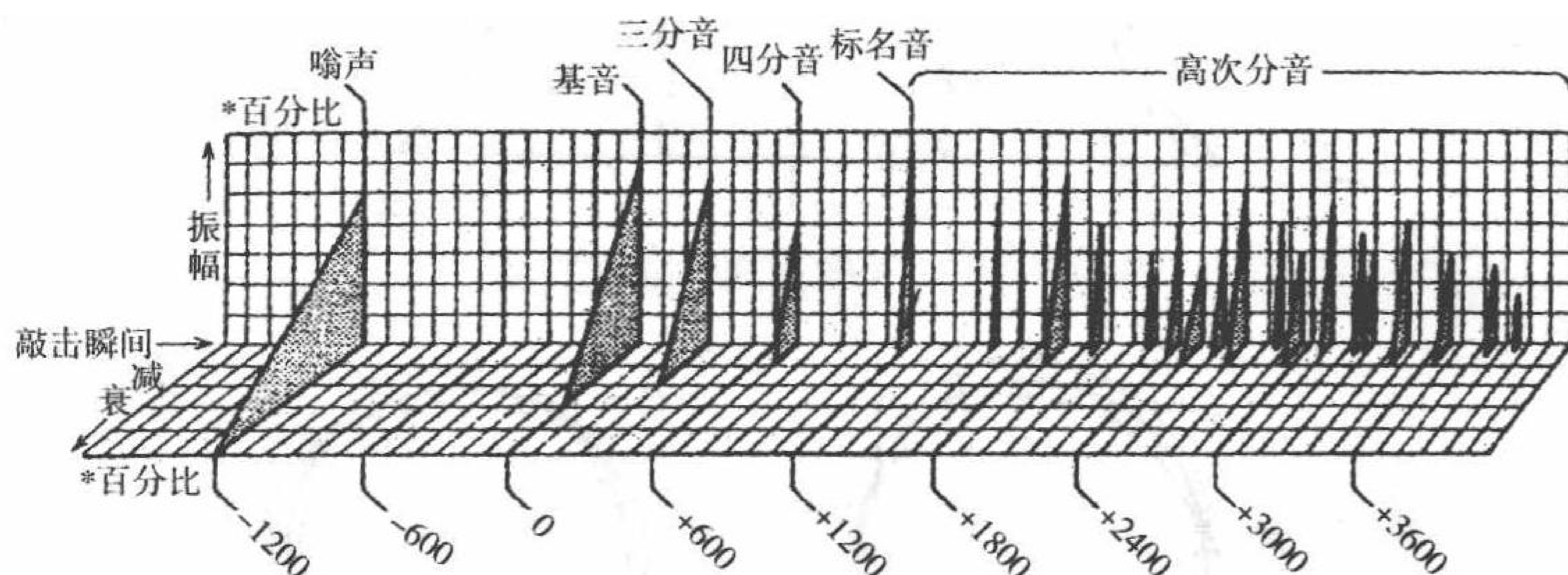


图 20　欧洲圆钟声频谱

（引自 *The New Grove Dictionary of Music and Musicians*，"*Bell*"，*Macmillan*，1980）

椭圆形钟（中国编钟），无论敲击其正面中央或侧旁不出现双节线的振动，它们的基音都是 4 节线。高次谐音很快消失，最后剩下的是基音。基音时间约 1 秒或稍多些。而对乐音干扰甚大的嗡声只在较大的（镈）和钟壁较厚的钟中存在。因此，椭圆形钟可以作为慢节奏的乐器使用。它的物理特性如图 21 所示。

鉴于其形状、钟口、枚乳及其内壁声弓结构的独特性，中国编钟可以磨锉调谐出二个基音：一个在中鼓，一个在侧鼓，分别称为中鼓音和侧鼓音。这样的钟称为双音钟，其双音的音程约为三度（或大三度，或小三度）。由图 19 可见，敲击中鼓与侧鼓，钟的振动节线位置不相同，中鼓音的节线恰好为侧鼓音波腹，而侧鼓音的节线恰好为中鼓音的波腹。通俗地说，这双音的振动节线（或波腹）恰好

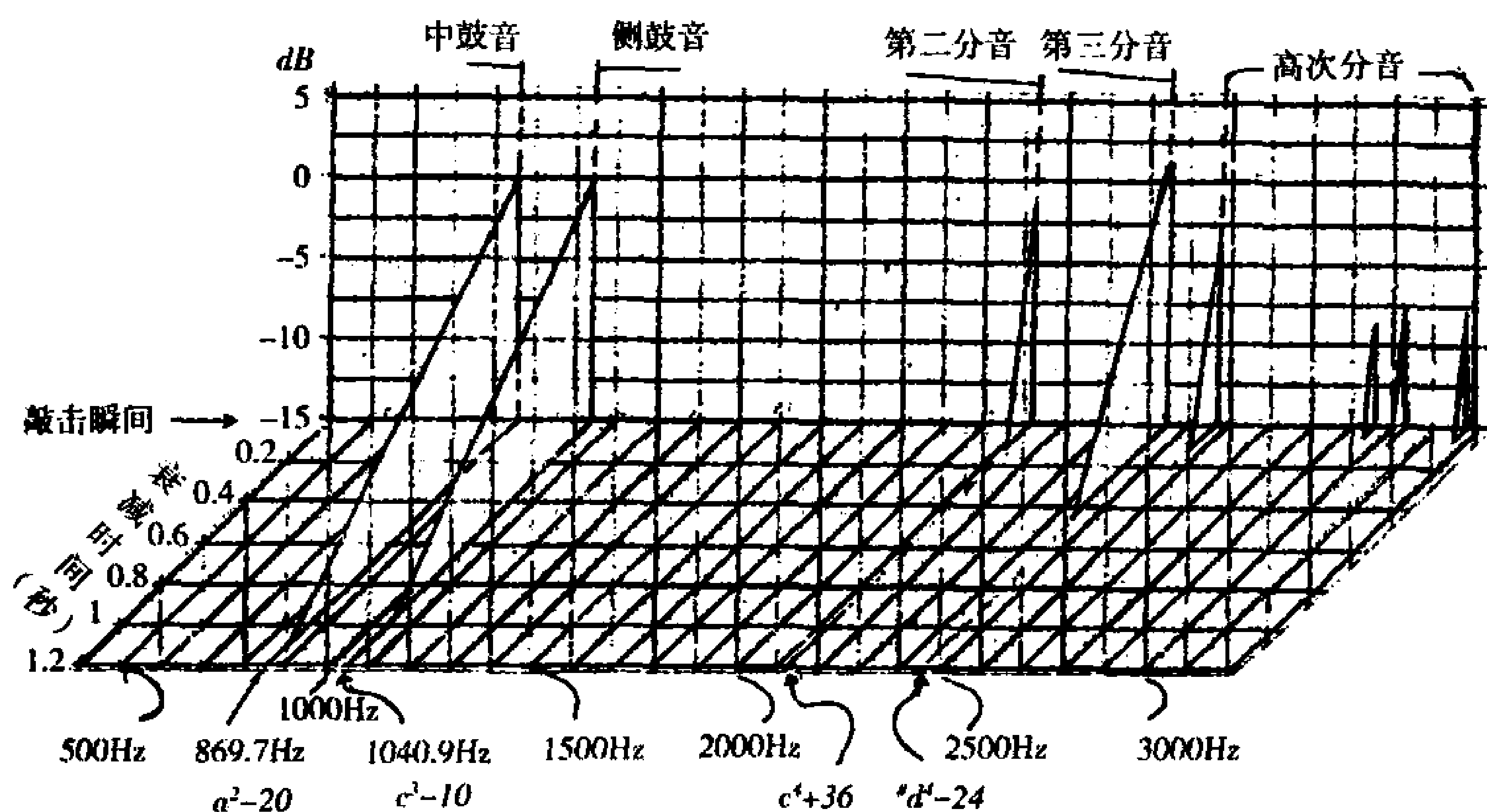


图 21　中国扁圆钟的声频谱

实验用青铜钟：高 26.5cm（不计甬长），钟口截面 18.8 × 14.5cm²，钟肩截面 17.5 ×12.6cm²。实测数据源自：陈通、郑大瑞：《古编钟的声学特性》，《声学学报》1980 年第 3 期，第 161—171 页。本图绘出双音钟的正鼓音和侧鼓音、正鼓音的谐波。3200Hz 以上还有几个衰减极快的谐波。侧鼓音的谐波与正鼓音情形基本类似，图中未再绘出。

错开了。换句话说，敲击中鼓音位，这位置是侧鼓音节线所在，侧鼓音不被激发；同理，敲击侧鼓音位，这位置是中鼓音节线所在，中鼓音不被激发。这就是中国编钟所以有双基音的道理。

周代，大量编钟有双音，且成三度关系。双音钟的侧鼓有标识纹饰或乐律文字。这表明古代铸钟师是有意制造的双音钟。自汉以降，制钟技术衰落，以致人们不识钟有双音。英国瑞利勋爵（Lord Rayleigh，1842—1919）的《声学》（Theory of Sound）于 1878 年成书。他根据欧洲圆钟判定：一钟一音。1970 年 4 月 24 日，我国第一颗卫星“东方红一号”上天，其上播放的《东方红》乐曲就是用 1957 年在河南信阳出土的楚国曾蕮（xíng lì）编钟（13 个

一套）演奏的。当时只知一钟一音，《东方红》乐曲中某一音却不能奏出，便临时在某一钟的钟柄上找到一相似音代之。20 世纪 70 年代中期，音乐家吕骥、黄翔鹏等人在全国普查音乐文物，偶然发现编钟的双音现象，当时很多人难以置信。笔者曾参与讨论，却也一时不明双音机理。直到 1980 年，中国科学院声学研究所陈通教授（时为副所长）等，以一个模型编钟实验，才揭开了如上所述的双音钟奥秘。

历史上有关编钟的设计、铸造、调音及其声学知识的文字记述也很丰富。感兴趣者可参阅相关声学史。《周礼·典同》记述了十二种钟的形状及其发声状况，其中“回声衍”三字描述了钟体圆、声音延展、延长音多。周朝的音乐家和铸造师以此否定圆钟作为乐钟的可能。《考工记·凫氏》详细记述了编钟从设计铸造到调音的一系列问题，指出“钟已厚则石，已薄则播”，“钟大而短则其声疾而短闻；钟小而长则其声舒而远闻”。宋代，发生了一场关于编钟形状、如何悬挂、甬之长短的长久而激烈的学术之争，参与争论者有铸钟师、调音师、经学大师李照、胡瑗，科学家燕肃等人。根据这场争论，沈括作出以下结论：

古乐钟皆扁如合瓦。盖钟圆则声长，扁则声短。声短则节，声长则曲——节短处皆相乱，不成音律。后人不知此意，悉为圆钟急叩之多晃晃尔，清浊不复可辨。

这是历史上关于圆钟和扁钟不同发声性状的科学结论。

六　中国编钟在文化史上的意义

世界各国都有钟，或普通钟，或歌舞乐钟。

但是，在欧洲，9 世纪才有少量圆铃组成的编钟乐器。11—12 世纪期间，才有关于铸钟的文字记载。14 世纪，欧洲人演奏编钟如图 22。从图中可见，钟铃内既有钟舌。演奏者又用木槌敲击，5 个钟铃组成的编钟最多是一个五声音阶。但其后，他们就开始创制演奏编钟的机械装置，到 17 世纪后半期，已有 52 个钟铃组成的编钟。18 世纪，有木制键盘，形成一个像样的钟琴。在 20 世纪初，圆形钟调音技术失传后，人们就以管子钟代替圆形钟。所谓管钟（或又称为排钟）就是类似水暖管一般的钟，其大小长短不等，令其发出乐音并构成音阶关系。但是，据设计者告知，这样的排钟，其中央 C 音的管子重达 23 吨。于是，有人说，若将它搬上舞台演奏，不仅舞台承重有难，音乐厅内也会产生可怕的震动波灾难。非但耳朵，甚而墙壁也未必能抵挡住

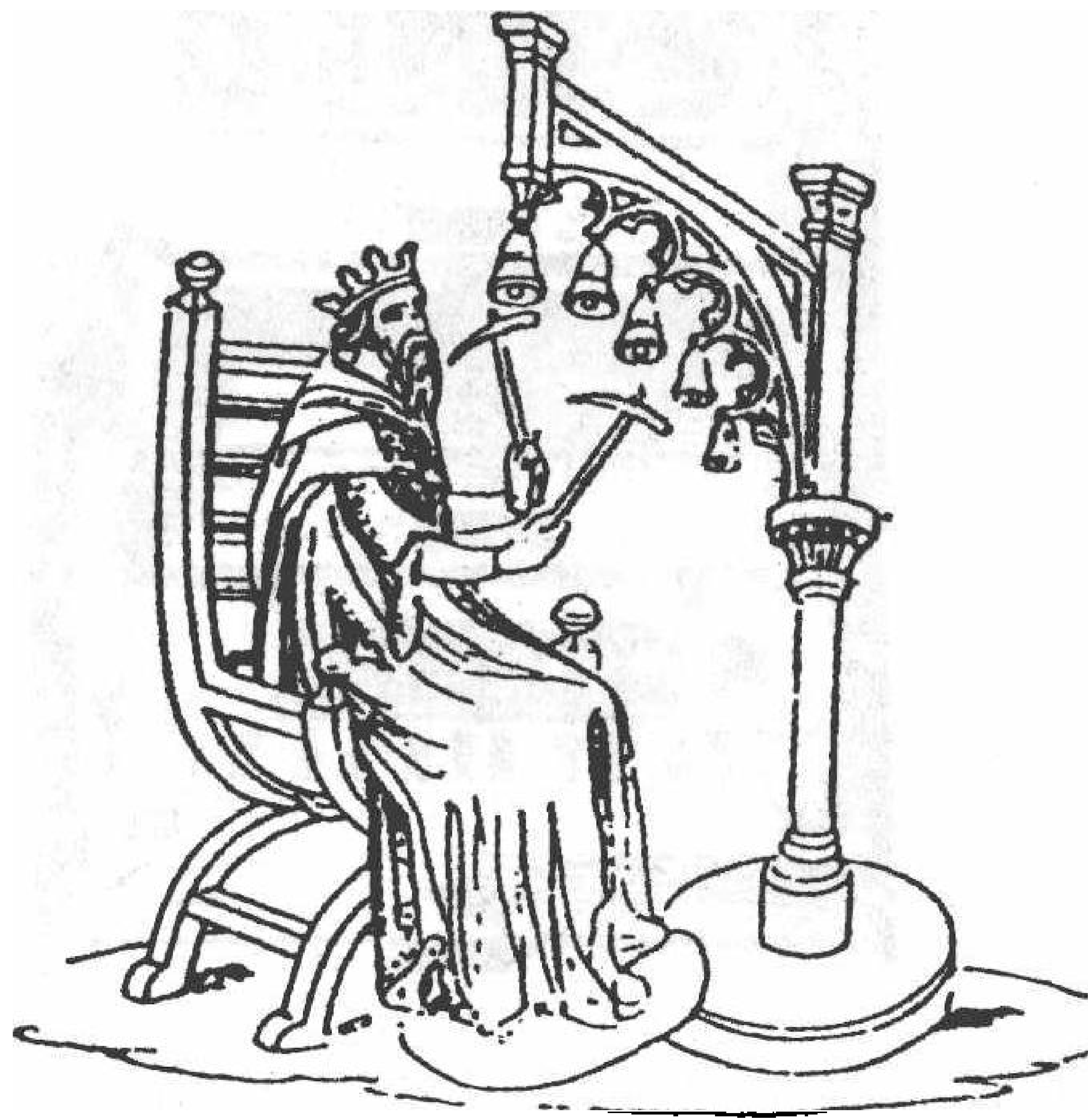


图 22　14 世纪欧洲的编钟演奏绘画

它的震动波浩劫。因此，他们断定，“青铜钟成为乐器还有很长很长的路，这类乐器是否可用，还令人怀疑”。

由是，20 世纪 50 年代就产生了电子钟琴（图 23）。它是以青铜杆代替钟的仿钟乐器。它只不过满足人们对青铜金属的音色爱好罢了。

然而，我们回头再看看曾侯乙编钟。它的 C 音钟到底多重？会否产生振动波灾难？

曾侯乙编钟的总重量才 2.5 吨，仅有发 C 音管子钟重量的近 12%。发 C 音的曾侯乙钟为 119.3 千克，为同音管子钟重的 $\frac{1}{193}$，甚至于低八度 C 音的曾侯乙钟也仅为 203.6 千克。曾侯乙编钟决不会有振动波灾难。迄今可断论，中国的编钟是世界上所有钟类乐器中最佳形状和结构的钟。它在 2000 多年前已经走上音乐舞台，即使将它搬到今日大型歌舞台和音乐厅内，也不会出现什么灾难。西方近现代难以解决的钟类乐器的音乐或声学问题，古代中国人早已找到了解决它的办法。



图 23　电子钟琴：以青铜杆代钟的仿钟乐器

类似编钟的壳振动并作为乐器使用的还有缶、镈于。同样，以壳振动令人陶醉的有喷水鱼洗，但它不是乐器，

而是宫廷的娱乐用具。本文限于篇幅，不再述及它们。

七　乐律学：三分损益律

乐律学是古代中国特有的学科门类，包括乐学（音乐学）、律学（乐律）与度量衡。乐律学实为计算振动体与乐音关系的科学，因为计算振动体大小、长短需要考虑历代度量衡的变化，度量衡就置于该学科内。计算方法的不同，就产生了不同律制，如三分损益律，十二等程律等。

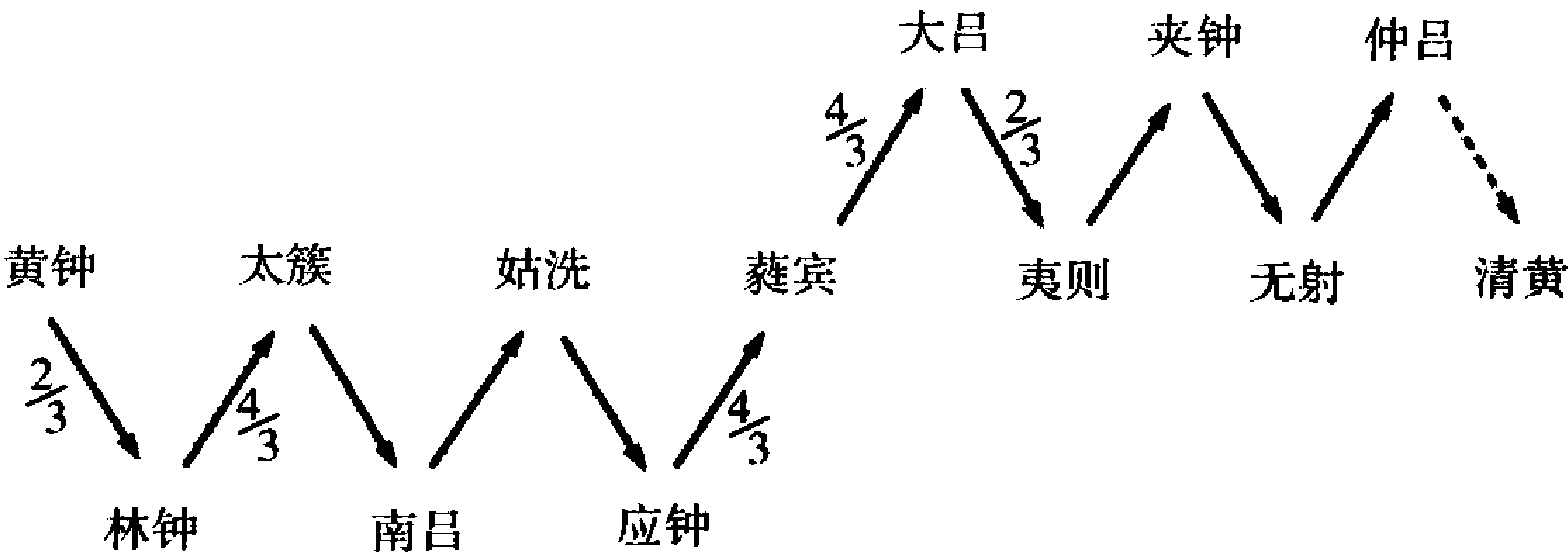
“三分损益”是科学史和人类历史上第一个以数学描述的自然规律。将固定两端的同一弦线（也即同质、同张力）之长分为三份，去其一份称为“损”（在数学上即乘以$\frac{2}{3}$），加上一份称为“益”（在数学上乘以$\frac{4}{3}$），合称为“三分损益”。以此数学方法确定弦长与其音高，称为“三分损益法”。由此方法得到的各乐音音高关系，称为“三分损益律”。“律”也就是音乐的音。

在西方，与“三分损益律”相同的律制，称为“五度律”。但仅用五度法定音，往往要移位（音位），即超出八度的音要移到所计算的八度内。而三分损益法总是在一个八度内完成十二律的计算，它比五度法更简捷。只要计算时记住古代人总结的经验：“先下后上，蕤宾重上”。

古代中国有见识的音乐家或数学家都将八度分为十二律。十二律及其音阶名称如下表所示。

律名	黄钟	大吕	太簇	夹钟	姑洗	仲吕	蕤宾	林钟	夷则	南吕	无射	应钟	清黄
西洋律名	*C*	#*C*	*D*	#*D*	*E*	*F*	#*F*	*G*	#*G*	*A*	*B*	#*B*	*c*
七声古音阶	宫		商		角		变徵	徵		羽		变宫	清宫

表中，变徵与变宫分别在仲吕、蕤宾和无射、应钟的不同律位，就构成不同的音阶。确定起始音黄钟的弦长后，先后乘$\frac{2}{3}$或$\frac{4}{3}$就可以得到其他十一律的弦长：



箭号斜下指乘以$\frac{2}{3}$（下生），箭号斜上指乘以$\frac{4}{3}$（上生）。由黄钟起始音所生的十一个律都在一个八度内。由于$\frac{2}{3}$是一个除不尽的数，因此，仲吕不能返黄钟（或清黄钟）。古代人称此为“不能返宫”。“返宫”（a clsed cycle）一词，实际上就是“五度轮”（图 24）成为一个闭合圆。欲要返宫，必用十二等程律的数学方法。“不能返宫”的另一解释是，三分损益的清黄钟与起始音黄钟的音程不是真正的八度，清黄钟比黄钟高 24 音分。这个差数称为古代

音差。

三分损益的最早文字记载见之于《管子·地员》。它采用“先上后下”，其所得的五声音阶中，徵音为最低音（弦线最长）。实际上，这是一个以徵为宫的五声音阶，也称五声徵调式。《管子》之后的文献，如《史记》、《吕氏春秋》、《淮南子》等，采用的是“先下后上”法，这一计算程序成为中国传统。

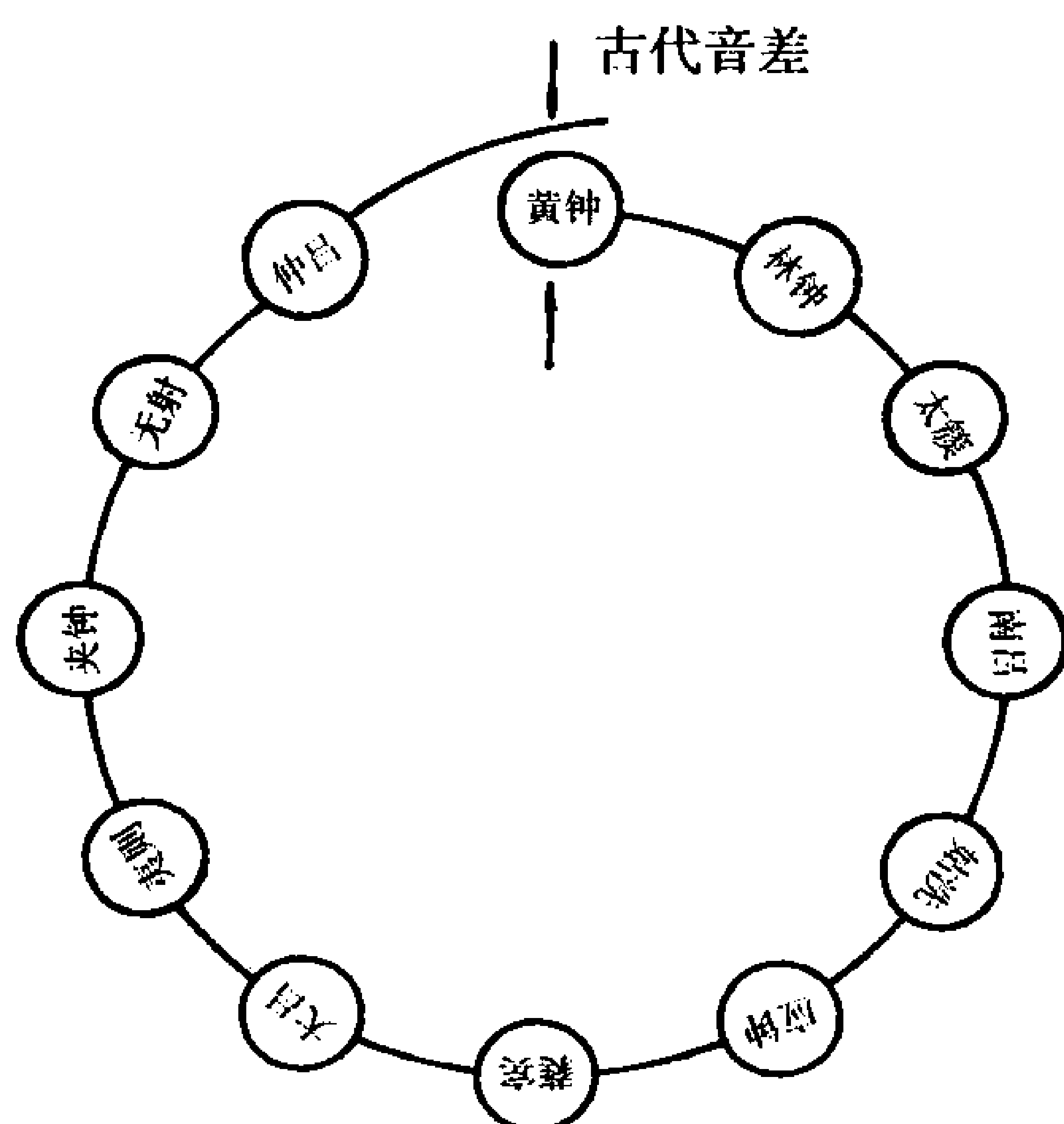


图 24　三分损益五度轮与古代音差

1986 年在甘肃天水放马滩一号秦墓中出土竹简《律书》，为秦始皇八年（前 239）之前写成。它记述了三分损益十二律的计算方法和数值。计算中用了两种起始音（黄钟）数值：81（即 3^4）和 177147（3^{11}）。计算结果与传统三分损益律完全一致。

《管子·地员》被认为是战国时期的作品。但它所记述的三分损益法可能在管仲（？—前 645）生活年代已为音乐家所知。在考古发现的大量周秦乐钟中，必定要用三分损益的音高标准器调律。例如，铸造于公元前 433 年的曾侯乙编钟，铸造于春秋中叶（约前 572—前 542）山西侯马编钟，铸造于楚成王初年（约前 671—前 655）河南淅川下寺

一号楚墓编钟，因有标准器调律，它们的音阶结构才趋于一致。这些编钟都是下徵调五声或七声音阶，而后者的铸成年代正是管仲的生活年代。

古代人使用的音高标准器有两种：一是弦线式，类似琴。先秦称它“均钟木”，汉以降称为“律准”，朱载堉称它为“均准”；一是管式，称为“律管”，自汉起盛行。创新或改进律制，都必须有音高标准器以调律，或用它展示其律制的合理性、先进性。标准器上的各个律位都是经过精确的数学计算而获得的，中国古代既有“律准”。何用“律管”？律准的弦线受天气、人为调音的影响较大，而律管容易保存，且一旦制成，则不受人为影响。但是律管的制作必须先用律准调校。北魏中书侍郎高闾（425—502）和一批音乐家在造标准器中说：“作准以定律，吹律以调丝”（《魏书·律历志》）。这说的就是制作“准”用以确定律音，然后以发出准确律音的“准”调校律管。此后便可以用此律管（可吹的律）去调各种丝弦乐器。自清末至20世纪中叶，个别音乐史家不明此理，以为古代音乐家仅仅以律管作为标准器，以致造成音乐史和声学史的误解。从物理观点看，以律管调音，必须先对律管作管口校正。我们在下面再叙述相关问题。

从汉代起，三分损益律有极大发展。汉代京房（前77—前37）演十二律为60律，其后又发展为360律。繁至极致，提供后人改进乐律的一系列计算数值，也令人引以为戒。宋代何承天（370—447）、王朴（906/915—959）等

人坚守十二律，确定倍频程值为2，探讨了旋宫转调的可能，从而走向了等程律的发展之路。晋代荀勖（？—289）以三分损益法创制笛律，提出了系统的管口校正数和校正方法，对以后千余年造笛箫等管乐器产生深远影响。直到清代，产生了许多大音乐家和乐律家。然而，清代康、乾二帝在乐律上是个学霸而已。他们祖孙二人所创建的十四律在管与钟上是完全错误的，而且蓄意反对朱载堉创建的十二等程律。奇怪的是，康熙帝身边还有两位西洋音乐教师，一是葡萄牙耶稣会士徐日新（Thomas Pereira，1645—1708），一是意大利遣使会士德里格（Theodoric Pedrini，1670—1747），他们任凭康、乾祖孙随意攻击朱载堉尚可理解，对康熙之十四律亦不闻其误乎？

八　朱载堉的十二等程律

朱载堉（1536—1611）是明宗室郑王之子。明太祖朱元璋九世孙。因家族内争嫡夺爵，又因载堉之父厚烷于嘉靖二十七年（1548）上书直谏，规劝皇上不再兴“神仙、土木”之功，直言皇上怠政、饰非、恶谏，终致革爵，禁锢凤阳。朱载堉时年15岁。他“笃学有至性，痛父非罪见系，筑土室宫门外，席稿独处者十九年”（《明史·诸王传四》）。载堉一生18年受难，14年写作，11年雕版印书，15年让爵，成为天潢异人。其著作《乐律全书》备载十二

等程律发明过程及相关计算与应用。它不仅是中国，而且是世界音乐史上划时代之作。

今天我们所说“十二等程律”，朱载堉称其为“新法密率”。“新法”是对往昔三分损益旧法而言，“密率”即多达25位数的2的12次方根：

$$\sqrt[12]{2}=1.059\ 463\ 094\ 359\ 295\ 264\ 561\ 825$$

他对“新法密率”定义如下：

创立新法，以密率除之，凡十二遍。

现代物理学辞典，音乐辞典也如是定义十二等程律。

严格规定八度音程为2，$\sqrt[12]{2}$就是十二等程律的半音。它也是由初项为1，末项为2构成的十二个等比数列的公比数。因此，若知起始音的音高为M，将M累乘（或除）以$\sqrt[12]{2}$，就可以获得十二等程律。朱载堉设定各种M值，作出精确计算，其数据多达25位。今日的袖珍电子计算器只能算到10位数。朱载堉在《律学新说》、《律吕精义内篇》中详细阐述了他的“新法密率”。

由于等程律是等比数列，所以它既可五度相生，也可四度相生、二度相生等，而三分损益律只能五度相生。等程律五度相生的比例因子为：

$$\frac{\text{林钟}}{\text{黄钟}}=\frac{10^9}{749\ 153\ 538}$$

其值略大于$\frac{4}{3}=\frac{100}{75}$。四度相生比例因子为：

$$\frac{\text{仲吕}}{\text{黄钟}}=\frac{10^9}{667\ 419\ 927}$$

这两个比数是在万历九年（1581）成书的《律吕融通附音义》中写下的。可见，朱载堉至晚在1581年之前已完成十二等程律的全部创建工作。

朱载堉还谱写了大量的等程律乐曲，制造了多种以等程律演奏的乐器：弦乐器"均准"，琴，瑟；管乐器编管，排箫，笛；簧乐器笙等。

然而，朱载堉发明的"新法密率"在明清两代受到极不公正的待遇。他将《乐律全书》献上明朝廷，得到的是"宣付史馆，以备稽考，未及实行"的结果。清朝，康熙帝《御制律吕正义》一书，窃用朱载堉成果以建其十四律制；乾隆帝《御制律吕正义后编》，诬朱载堉新理论为"十大臆说"，甚而在十年间下了六道"上谕"、"御诗"、"御文"，令皇六子永瑢及内廷翰林"辟识"（今批判是也）朱载堉新学说。下旨"（新法密率）只备一家言或可，束之高阁正相当"。在康、乾祖孙高压下，清代鲜有人敢袭用新法密率，甚至如陈澧（1810—1882）等乐家、学问家，也明知其是，而言其非。从顺治朝起的清代268年间，只有一个人是朱载堉的知音知己，那就是江永。

江永（1681—1762），从而立之年起，一心追求乐律在数学上返宫，在实践上的旋宫转调。直到他77岁第一次读到《乐律全书》，则"悚然惊，跃然喜"，"是以一见而屈服也"。一年后，他写成《律吕阐微》一书，在序中表达对王子载堉的敬佩，驳乾隆帝等"无理避识，妄加评隙"。他在其书中，又以祖冲之圆周率重算等程律律管，使"言律学

者无可凿智翻案之理”。《四库全书》的编纂者，捧乾隆圣旨，收入《律吕阐微》一书时，公然将其“序”撕下，不予披露，不留后患。

九　关于等程律理论的优先权之争

在欧洲，提出等程理论的两个人，一是荷兰数学家、物理学家斯蒂芬（Simon Stevin，1548—1620），一是法国数学家和科学家梅森（Marin Mersenne，1588—1648）。后者于1636年以无理数1.059 463调律，比朱载堉《律吕融通》晚55年。前者在约1600年写下《论歌唱艺术的理论》一文，文中对等程律作出某种计算。但此文不久遗失了，待到1884年发现该文时，已时过境迁。由此，长久以来，人们说：“欧洲等程调音音阶的起源是模糊不清的。”（*A New Dictionary of Physics*，ed. by H. J. Gray and A. Issacs，Longman Ltd，1975，p. 530—531）

由于以上原因，20世纪70年代以前，大家几乎公认朱载堉发明的优先权。英国科学史家李约瑟（Joseph Needham，1900—1994）于1962年出版的《中国科学技术史·物理学》中曾说：“欧洲独立发明等程律一事是极可疑的”，“朱载堉对人类的贡献是发现了将音阶调谐成相等音程的数学方法”，“毫无疑问，首先从数学上系统阐述等程律的荣誉当归之于中国”。李约瑟还写道：“发明者的姓名较之发

明的事实，仍属次要，而且朱载堉本人肯定是第一个给另一研究者以应得评价并最后一个争优先权的人。”比李约瑟更早时候，中国的学者刘半农（1891—1934），德国音乐家黎曼（Hugo Riemann，1849—1919），英国音乐理论家埃利斯（A. J. Ellis，1814—1890），德国物理学家赫姆霍茨（Hermann von Helmholtz，1821—1894）等都曾说过类似的话。

然而，1970—1975 年间，有人提出了不同看法。1970 年，荷兰学者代斯特赫伊斯（E. J. Dijksterhuis）在编辑《斯蒂芬：约 1600 年荷兰的科学》一书中，写了一篇“导论——斯蒂芬的音乐观”。该文将先前认为斯蒂芬《论歌唱艺术的理论》的写作时间约 1600 年提前到 1585 年，比朱载堉《律学新说》（作序于 1584 年）一书只差一年。因此，代斯特赫伊斯在他的“导论”结束段中借用李约瑟的话说：“发明者的名字比起发明的事实本身并不重要，斯蒂芬本人肯定是第一个给另一个研究者以应得的评价并最后一个争优先权的人。”从他口中说出这句话，显然是不争之争的笑面语。

相比之下，1975 年，美国音乐家库特纳（Fritz A. Kuttner）就毫不掩饰了。他在其大作“王子朱载堉的生平和著作”（载于 Ethnomusicology，vol. 19，No. 2，1975，pp. 163—201）一文结语中不客气地说：“要重新评价”朱载堉，以免在优先权问题上“给人产生片面之感”，“抹去王子朱在等程律上存在的虚幻的光环”，“要把某些学者归功于朱载堉的过高荣誉调整到一个较为现实的评价上”，云云。

我国音乐界前辈、音乐史家杨荫浏先生读完库特纳论文后，迫不及待地叫我到他府上，指着那篇文章给我看，语重心长地说："不知道批林批孔能不能批这个。""你回去好好读读，看看他玩什么数学手段"，"有机会写篇文章，和他理论理论"。

从 1984 至 1988 年间，笔者曾写下多篇有关朱载堉数学、乐律方面的文章和一本书《朱载堉——明代的科学和艺术巨星》。库特纳得悉我的书后，即复信告知：他的汉字"不识一百个"，只是于 1949 年前曾"在中国上海圣约翰大学教过三年英语"，并表示愿意修正自己的学术看法。由此看来，他是个真正的学者。

然而，问题并未完全、彻底解决。朱载堉的等程律理论传播到欧洲的证据尚付阙如。若不解决此问题，只能得出朱载堉与斯蒂芬各自独立发现等程律数学理论的结论。

十 等程律数学方法西传之可能

大约 1995 年，美国北德克萨斯大学音乐学教授卓仁祥先生（Dr. Prof. Gene J. Cho）也开始研究朱载堉。为此，特来北京，与本文作者讨论有关问题。卓教授通过在欧美各大图书馆寻觅史料，终有所发现：西学东渐的标志性人物、传教士利玛窦（Matteo Ricci，1552—1610）曾两次在致书

罗马教皇中涉及朱载堉及其改历建议。我们将此事件的前因后果作如下概述。

先必须了解斯蒂芬《论歌唱艺术的理论》一文如何求解等程律？

他在文中定义起始音为1，八度（六个全音）为1/2，正确地写下了等程律的十二律开方表示式：

$$1,\quad \sqrt[12]{1/2},\ \sqrt[6]{1/2},\ \sqrt[4]{1/2},\ \sqrt[12]{1/32},\ \sqrt{1/2},$$
$$\sqrt[12]{1/128},\ \sqrt[3]{1/4},\ \sqrt[4]{1/8},\ \sqrt[6]{1/32},\ \sqrt[12]{1/2\,048},\ 1/2$$

令人奇怪的是，这位数学家未对半音$\sqrt[12]{1/2}$直接作开方运算。原本很简单的事，他却复杂化了。他令起始音的弦长为10 000，则高倍音弦长为5 000。然后解出“三个半”全音（对应于$\sqrt[12]{1/128}$）弦长为6 674（斯蒂芬不直接算$\sqrt[12]{1/128}$，而将该数先换算成$\sqrt[12]{78\,125\times10^{41}}$），“二个半”全音的弦长为7 491（算此弦长时，中间另有繁长的数学变换），也即它们与起始音之比（音程）分别为$\frac{10\,000}{6\,674}$和$\frac{10\,000}{7\,491}$。他计算得到的半音为1.059 5。所有十二律中，相邻两律的音程（即半音或等比数列公比数）在$1.058\,9<\sqrt[12]{2}<1.060\,0$之间。与朱载堉的相关计算及数值比较，显得方法累赘、数值不精。

斯蒂芬在《论歌唱艺术的理论》一文中强调荷兰语是音乐艺术和他进行乐律计算的基础。至于该文的写作时间，库特纳等人都以斯蒂芬《论算术》（1585）的法文论文为依据。

在其《论算术》文中证明了 $\sqrt[12]{2}=\sqrt{2}\cdot\sqrt{2}\cdot\sqrt[3]{2}$，这无疑为他列出十二等程律各个开方奠定了基础，但并不等于当年他完成了等程律计算。何况这二文的文字语言完全不同。1585 年，他可能尚未有“荷兰语为艺术基础”的等程律的概念。当初，人们估计《论歌唱艺术的理论》完成于 1608 年，后提前到 1600 年，或许得知朱载堉上进《历书》在 1595 年的缘故；其后，又提前至 1585 年，显然是因为朱载堉于 1584 年为《律学新说》作序之因。如今，完全证实朱载堉于 1581 年之前完成创建等程律的全部工作，并有了《律学新说》、《律吕精义》的初稿。斯蒂芬独立完成等程律的创建工作，无论在时间上或数学计算上都是令人怀疑的。

自从 1582 年耶稣会士利玛窦入华后，正如李约瑟所说：从中国“发出一股书简的洪流，将中国文化内容的实质告知西方世界。”正是利玛窦本人先后两次向罗马教皇报告关于朱载堉上进《历书》事，同时表达速派通晓历法的数学家到中国的期盼之情。其中指出，“郑世子于 1595 年 10 月向礼部进呈《历书》的同时，提出如下意见：‘新近闻悉，历法已经出现差误并且需要修订’”。实际上，朱载堉上进《历书》的时间为万历二十三年六月十九（1595 年 7 月 25 日）。当年 10 月应是利玛窦本人闻悉相关事件，甚至读毕《历书》，动笔给罗马教皇写信的时间。由此可以想到，朱载堉关于等程律五度和四度计算方法的两个算式也首次由

利玛窦报告了欧洲学术界。他只要一句话足够了："我知道中国人如何使五度轮成为一个闭合的圆，只要以$\frac{10\ 000}{6\ 674}$或$\frac{10\ 000}{7\ 491}$代替 2/3 就成功了。"可惜，利玛窦无足够耐心将朱载堉的数据抄全，以致斯蒂芬的数据不精。斯蒂芬闻悉此讯，作为数学家的他可以轻而易举地写下他的荷兰文论文。他在论文中之所以不直接作开方计算，并着意繁衍数学也就可以理解了。再则，他确实从来自中国的信息中作出了一项惊动欧洲的发明，即从中国加帆手推车信息中发明了他的陆地帆车（"陆地快艇"）。

斯蒂芬写完论文后，尚无信心，便将手稿寄给他的一个懂音乐的朋友审阅。这个朋友读毕后就将它搁置一旁。斯蒂芬本人也不甚关心此文。就这样，直到 1884 年，人们才又发现这份手稿。斯蒂芬手稿遗失了，此后才有法国梅森再提出等程律。利玛窦也在 1610 年作故于北京，而其后却有更多耶稣会士来华。这些耶稣会士完全可能再一次向欧洲报告有关等程律的学术信息。

万历三十四年八月初四（1606 年 9 月 5 日），朱载堉上进《乐律全书》，连同他让出国爵一事又一次轰动京城。此时先后有一大批传教士来华。其中，法国耶稣会士金尼阁（Nicolas Trigault，1577—1628）、德国的邓玉函（Jean Terrenz，1576—1630）和汤若望（J. A. S. von Ball，1591—1666），他们在中西间的通讯联络尤为勤快。金尼阁在河南传教三个月，

又于1613—1617年返欧；邓玉函与近代物理学开创人伽利略（G. Galilei，1564—1642）及其父亲都是意大利灵采研究院（Accademia dei Lincei）院士，而天文物理学家开普勒（J. Kepler，1571—1630）是这个研究院通讯院士。邓玉函与汤若望又是明末崇祯历局聘请的外籍官员。他们不可能不将朱载堉的乐律理论告知欧洲，尤其是伽利略和开普勒等人。为了得到准确推算日食时间，邓玉函多次致信开普勒，甚至对伽利略受宗教裁判所谴责表示同情之心。而在欧洲，博学多才的梅森就完全有可能获得朱载堉的学术信息。

梅森本人不仅对数学、物理、天文、音乐、哲学皆有所造诣，且与社会各界有广泛联系，被誉为"科学家中伟大的中介人"。他在1636年出版的《和谐通论》（Harmonie Universelle）中以公比数1.059 463提出了等程律。学术界长期怀疑这比数来自朱载堉的著作，但他未指明其来源或引注文献。为何？

众所周知，伽利略于1616年宣传日心说而违犯教规，受传讯。1630年，他又出版《两大世界体系对话》，公然宣传日心说，又造成他1634年受宗教裁判所审判。由此，欧洲大陆科学界曾沉寂一时，科学家小心谨慎。两年后，梅森出版《和谐通论》。此时隐讳学术信息的来源，读者们是可理解的。殊不知，这就造成了"欧洲等程律调律音阶的起源是模糊的"的误判。

然而，自梅森之后，迄德国物理学家、生理与心理音乐

学家赫姆霍茨（1821—1894）时代，人们脑海中还遗有“王子载堉”对等程律贡献的种种传说，说他是耶稣降生前1500年的伟人，说他将八度分成十二个半音，莫衷一是。从社会学角度看，这些传说正是当年耶稣会士传话的考古遗迹。

1997年11月1日，江泽民主席在美国哈佛大学演讲中说：“明代朱载堉首创十二平均律，后来被认定为世界通行的标准调（tiáo）音。”

这是对20世纪100年来研究朱载堉及其音乐理论的肯定和结论，也是对研究者们的鼓励。

十一　管乐器的末端效应与管口校正

前已述及，弦振动是横波；管乐器是管内空气柱的振动，它是纵波或疏密波。由于惯性，空气柱的振动会延伸到管口外稍许，这称为管乐器的末端效应。也因此，同长的弦与管并不同音。若其同音，则要对管乐器作管口校正。举例说，9寸长的弦音必略高于9寸之管音；9寸管若为C音，则同径之6寸管绝非G音。管口校正由此而来。

汉代京房提出“竹声不可度调”。他已察觉到管弦同长不同音的问题。而且对后世乐律学的发展产生了极大影响。晋代荀勖造笛，已发明了笛上开孔的经验校正公式。宋代阮逸、胡瑗（993—1059）以缩小管子直径的办法对三分损益律管作校正，取得了极好的效果。历史上成绩最卓越者

乃朱载堉，他提出了一个系统的等程律管的校正方法。

朱载堉作了这样的管律实验。他说：

以竹或笔管制黄钟之律一样两枚，截其一枚作两段，全律、半律各令一人吹之，声必不合矣。此昭然可验也。

实验结果使他得到在同径管乐器中“黄钟正律与大吕半律合”的结论。这就是说，同径管乐器的黄钟正律与黄钟半律为约略大七度。他的这个实验与结论影响了清代几百年的音乐家，以致康熙帝定十四律时也抄袭他的成果。

朱载堉以缩小管径的方法校正管乐器。他令管长与等程律的弦长一致，倍黄钟音的管径定为 5 分（约合 1.78cm），每支管都有相同豁口（吹口），其面积为：长 × 宽 = 一分七厘六毫（约合 0.450 6cm）。从倍黄钟开始，36 支管径缩小的公比数为$\sqrt[24]{2}$。这样，他创制了世界上最早的等程律管，将它们编排吹奏，就是等程律的排箫。

19 世纪，英国物理学家丁铎尔（John Tyndall，1820—1893）在其《声学》中说：“半长管为全长管的八度”。此时，徐寿（1818—1884）也在研究管乐器。他从朱载堉的律管试验中受到启发，发现了对于弦线“正半相应”；对于管“正半不相应”，相应者其管长之比为 4/9。在徐寿读到《声学》中译本后，他对这个大物理学家的结论感到茫然。于是，他请英国教士傅兰雅（John Fryer，1839—1928）将其结果译成英文，致信丁铎尔求教。傅兰雅又将此信寄一份副本给英国《自然》（Nature）杂志。不料，此信在英国

声学和音乐学界引起惊叹。1881 年 3 月 10 日出版的《自然》杂志以“中国声学”为题刊载了这封信。这是中国人在国外刊物上最早发表的一篇科学文章。该杂志还写了“编者按”。其中说，“发现对旧定律（即弦管同长同音——本篇笔注）的真正有科学意义的现代修正却来自中国”。文末还附上声学家斯通博士（Dr. W. H. Stone）对该文的评论。其中说：“很有意思的是，证实这个鲜为人知的事实（即管乐器末端效应——本篇笔注）却是来自遥远的东方，而且是以如此简单的实验方法得到的。”

厚积薄发的中国传统声学，由此可见一斑。

十二　笙簧

笙竽，在甲骨文中写为龠等字形都类似编管的乐器形状。《诗·小雅·鹿鸣》：“吹笙鼓簧”。可见笙竽是簧管类乐器。古代统称其为匏、匏笙。曾侯乙墓出土一件匏笙，其簧片的安装方式：板孔略大于簧片，簧片在气流作用下做一端固定的自由振动（图 25）。这种安装簧片的方法称为“活簧”。18 世纪起，笙竽、匏笙被欧洲人称为“中国管风琴”或“口吹管风琴”（mouth organ）。

欧洲也自古有簧类乐器，如管风琴者。但它的簧片略大于板孔，簧片不能自由振动，而是拍打孔边。后人称其为“死簧”。其声极难听。

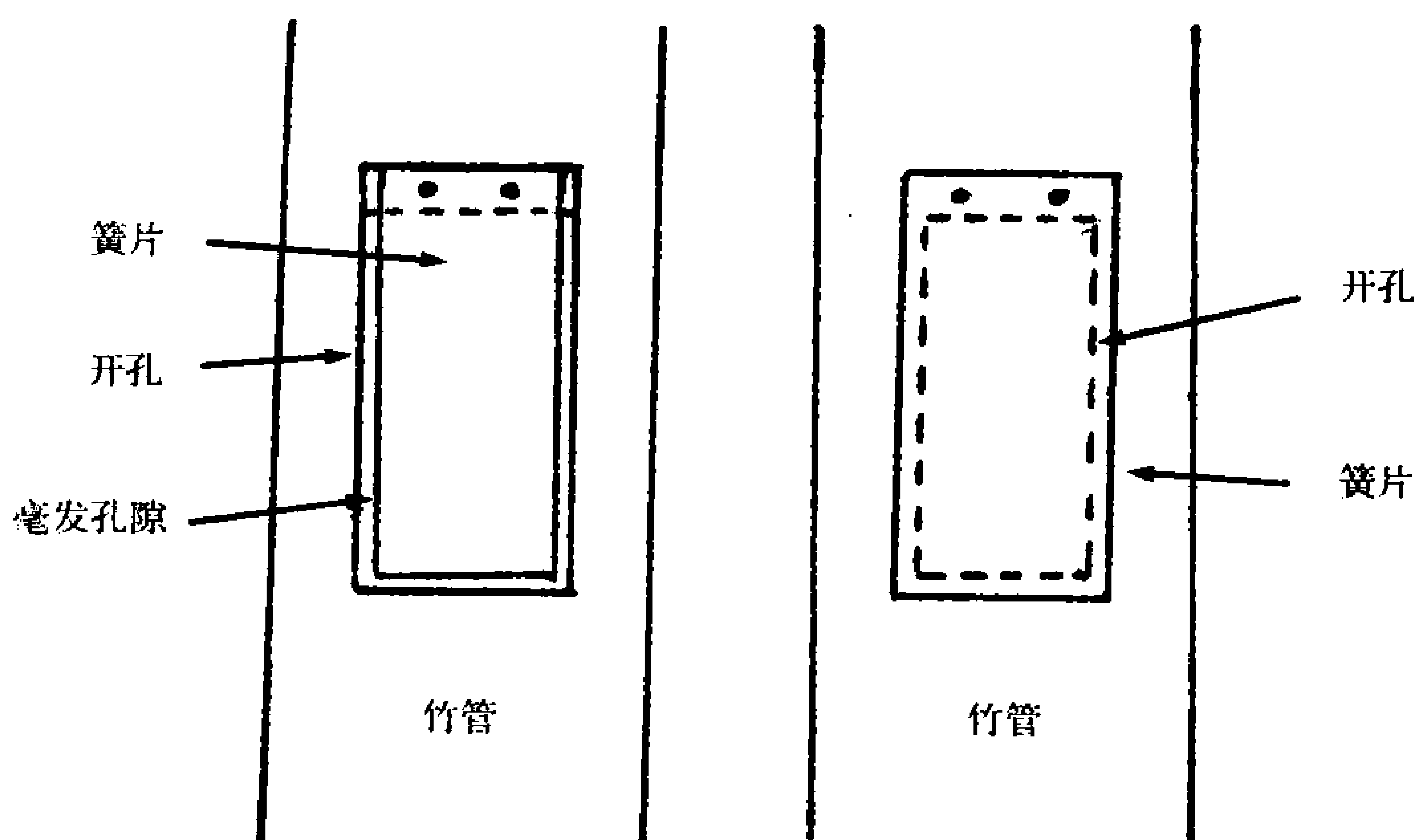


图 25 活簧（左）与死簧（右）安装法

据《元史·礼乐志》载，西方管风琴曾在元代经阿拉伯国家传入中国，时称其为“兴隆笙”。由于是“死簧”，文献记载其“有声无律”。后经元朝玉宸院大乐家郑秀“改作”，可能是将其死簧改成活簧，声律乃合。后又增制了十具。不过，兴隆笙随元朝灭亡而消失。未曾在华夏流传下来。

中国活簧装法，在历史上本也有众多机会西传，如公元前 138 年张骞通西域；盛唐，中外使节往来频繁；蒙古军铁骑横扫欧洲等。然，迄今有据可查，为中西共识的是在 18 世纪经俄罗斯而传遍欧洲大陆，且笙竽不止一次被带到西方。更确切的是，闻名的按指小提琴（nail violin）发明人、音乐家怀尔兹（Johann Wilds）在圣彼得堡买中国笙，学习它的演奏方法；哥本哈根的物理学家克拉特森斯廷（Kratzanstein）曾建议，仿中国笙簧改造管风琴。因此，英国物理学家丁铎尔在他 1865 年出版的《声学》中写道：

旧法之簧，大于板孔，故动时每次击孔边而生浊音；继加软皮于孔边受簧击，生音稍清；近时作板孔稍大于簧，使簧动时不相击，则所生之音甚佳矣。

丁铎尔对欧洲管风琴装簧史作了极好的记述。

由于笙在欧洲的传播，1800 年起，遂引起欧洲簧管乐器的革命，很快就设计并制造了诸如手风琴、簧风琴、六角手风琴、口琴等。它们又先后传遍世界各国，并为音乐爱好者喜用。

乐律、乐器中声学或物理学的历史知识，今日难予讲尽。例如，古琴与纯律等，未曾述及。下面再讲一点物理声学，即隔声建筑。它的创造及文化背景极为有趣。

十三　隔声建筑

古代人曾屡屡幻想将声音隔断在某一空间，不任其传出。因为，纵使“窃窃私语”，还往往“隔墙有耳”。

第一个建造隔声建筑的人，是明初僧人姚广孝（1335—1418）。

明末方以智（1611—1671）在其《物理小识》中写道：

私铸者匿于湖中，人犹闻其锯锉之声，乃以瓮为甃，累而墙之，其口向内，则外过者不闻其声。何也？声为瓮所收也。

这段文字叙述了建造隔声房的方法、材料和原理（图

26）。并且指出，“广孝用此法造器械。”

姚广孝何时、为何要造隔声房？

姚广孝，长洲（今苏州）人，幼名天禧，本医家子，14岁入寺为僧，法名道衍。因助燕王朱棣夺其侄朱允炆（建文帝）帝位有功，永乐二年，已登基三年的成祖帝（朱棣）复其姓，赐名广孝。朱棣夺位前，居北平旧元宫内，广孝于后苑练兵，日夜铸造军器。为防泄露天机，他掘地数丈，筑厚垣，密砌瓶缶瓦器为墙，又在地面畜鹅鸭以乱其声。旧元宫浩大，陆续征收几万士兵集后苑，建文帝嫡系将领及密探却未发现朱棣之燕王府内动静。起兵前，道衍献计朱棣装疯于街上，疏虞朝廷监控之势。起兵后，朱棣挥师南下，道衍驻守北平，多次击退建文帝军士，并密书朱棣进退攻略。当朱棣攻克济南三月不成之时，道衍又上计：“佯攻北上，疾趋京师（南京）。京师单弱，势必举”。此一计定下永乐帝江山。

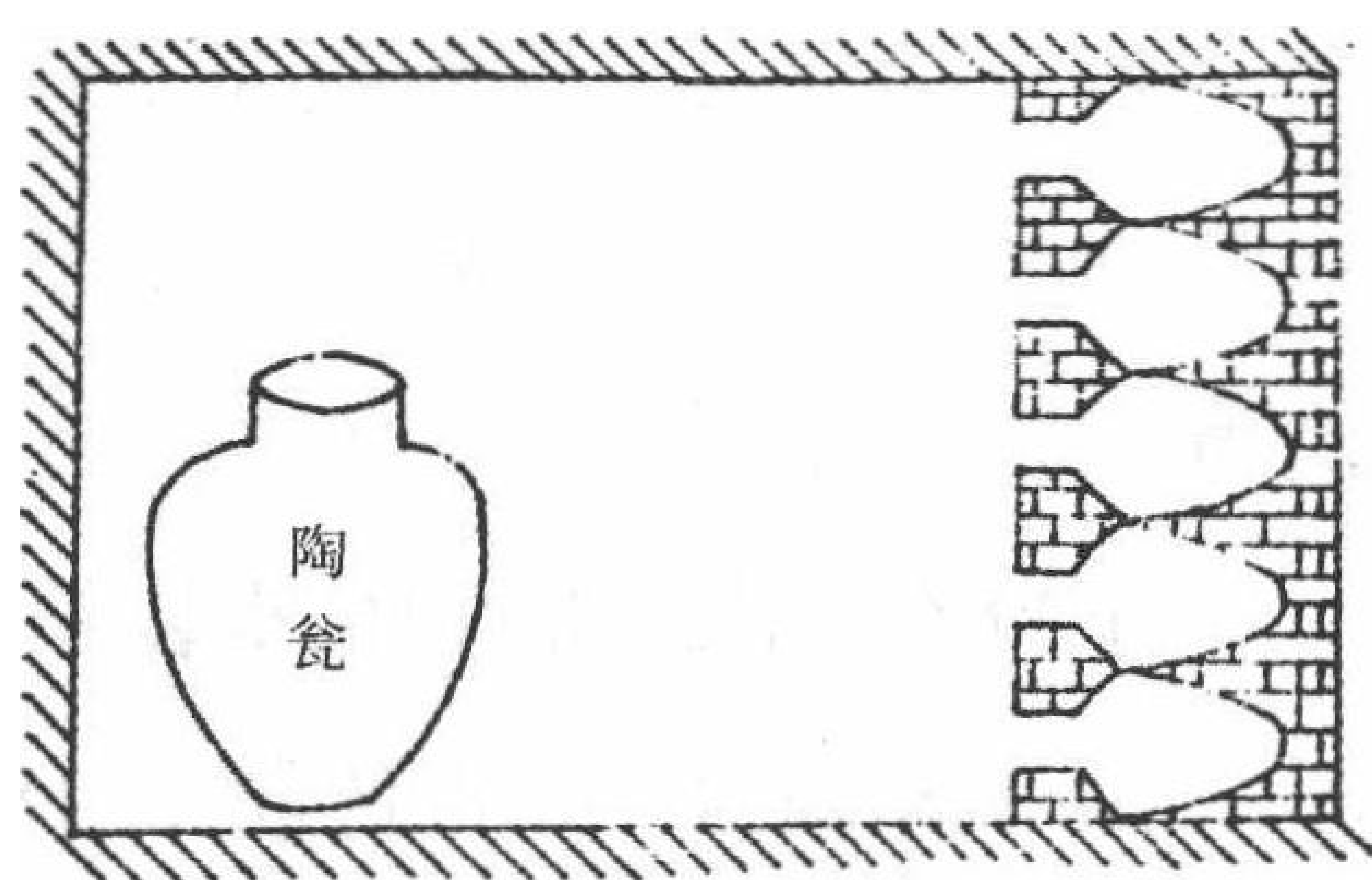


图26 陶瓮砌墙纵剖面示意图

姚广孝建造隔声房事为《明史》等诸多典籍所载，“隔声”（sound insulation）一词最早为方以智所创。此后即广为众所知。清代尚有富人筑隔声房者。隔声墙所用大小陶瓮、瓶、缶，极为类似近代初建隔声墙所用的亥姆霍茨共鸣器。若在瓮口塞以棉花纸屑或诸如甘蔗渣等多孔物质，其吸声效果更佳。

第四章

指南针与罗盘

指南针和造纸、印刷术、火药统称为中国古代的四大发明。它们曾受到弗兰西斯·培根（Francis Bacon，1561—1626）和卡尔·马克思（Karl Marx，1818—1883）的高度称赞。马克思将这些技术发明看作是“资产阶级发展的必要前提”（《马克思恩格斯全集》第30卷，人民出版社，1975年，第318页）。我们谈谈指南针和罗盘在中国历史上的起源、发展及其对世界社会变化的影响。

谈到指南针，必涉及古代人所掌握的静电和静磁知识。限于篇幅，我们只能提及与罗盘的相关部分。古代中国人的许多相关知识可参阅拙作《中国物理学史》或《电和磁的历史》。

作为技术发明的指南针与磁学知识对应阶段大致如下：

级别	知识状况	技术发明及年代
1	磁极性	娱乐“斗棋”，战国末期至汉代
2	磁指极性	司南，战国末期至汉代
3	磁偏角	指南针，罗盘，唐代
4	地球是个大磁体	小磁性地球，1600年，W·Gilbert

四大发明被公认为古代中国人的创造。纵使目前国际学术界有些异议，但尚无确凿证据与史实表明其他民族或地区有更早的发明或发现。

一　司南

“司南”是一种磁性指向器，是以天然磁铁（Fe_3O_4）琢磨而成。历史上“指南车”即是一种机械指向器，它创始于三国马钧（生卒不明）。在历史文献，特别是魏晋以降的典籍中，“司南”与“指南”的混用，造成今日学术界相关科学知识与技术工艺的一些异议与疑惑。半个世纪前，文博学家王振铎（1913—1992）对司南与罗盘的全面研究，奠定了今日认知司南为磁性指向器的基础。

关于司南的最早文字记述见之于战国末期《韩非子·有度》：

夫人臣之侵其主也，如地形焉，即渐以往。使人主失端，东西易面，而不自知。故先王立司南以端朝夕。

“端”有二意：一为物之“起始”、“头前”之意，暗含方向。引文中前一个“端”字作如是解；一为“正”，为动词。后一“端”字作如是解。“朝夕”二字在此借用为“东西”方向。“端朝夕”即“正东西”方向。引文大意是说：君主属下之奸臣欲害其主，改变君主之治国理念或方向，总是一步一步、一点一滴而逐渐进行的。这样，就能使君主失去方向，变换路线而不自知。故此，先王创制“司南”以便正东西方向。

“司南”是政治原则还是器物？直到东汉王充（27—97）

才对它的形制、物理特性作出记述。他在《论衡·是应篇》中写道：

屈轶之草，或时无有而空言生，或时实有而虚言能指。假令能指，或时草性见人而动。古者质朴，见草之动，则言能指，能指则言指佞人。司南之杓，投之以地，其柢（dǐ）指南。鱼肉之虫，集地北行，夫虫之性使然。今草能指，亦天性也。

整段文字，叙述了三种“物”：屈轶之草，司南之杓，鱼肉之虫。前者植物，后者小动物，居间者为普通物体。它们的本性相同，都能指示方向。

据王振铎考证：“地”即汉代占卜用工具“式盘”之下半部，称为“地盘”；“柢”原指树根，此借为杓柄。司南类似日用器物“杓”，将它置于占卜用的“地盘”上，其柄（柢）指向南方。他据《韩非子》和《论衡》记载，断此能指示方向的器物必为天然磁石所制成的杓柄式指向器，并将其复原如图27。它的创制时间当在战国末期。

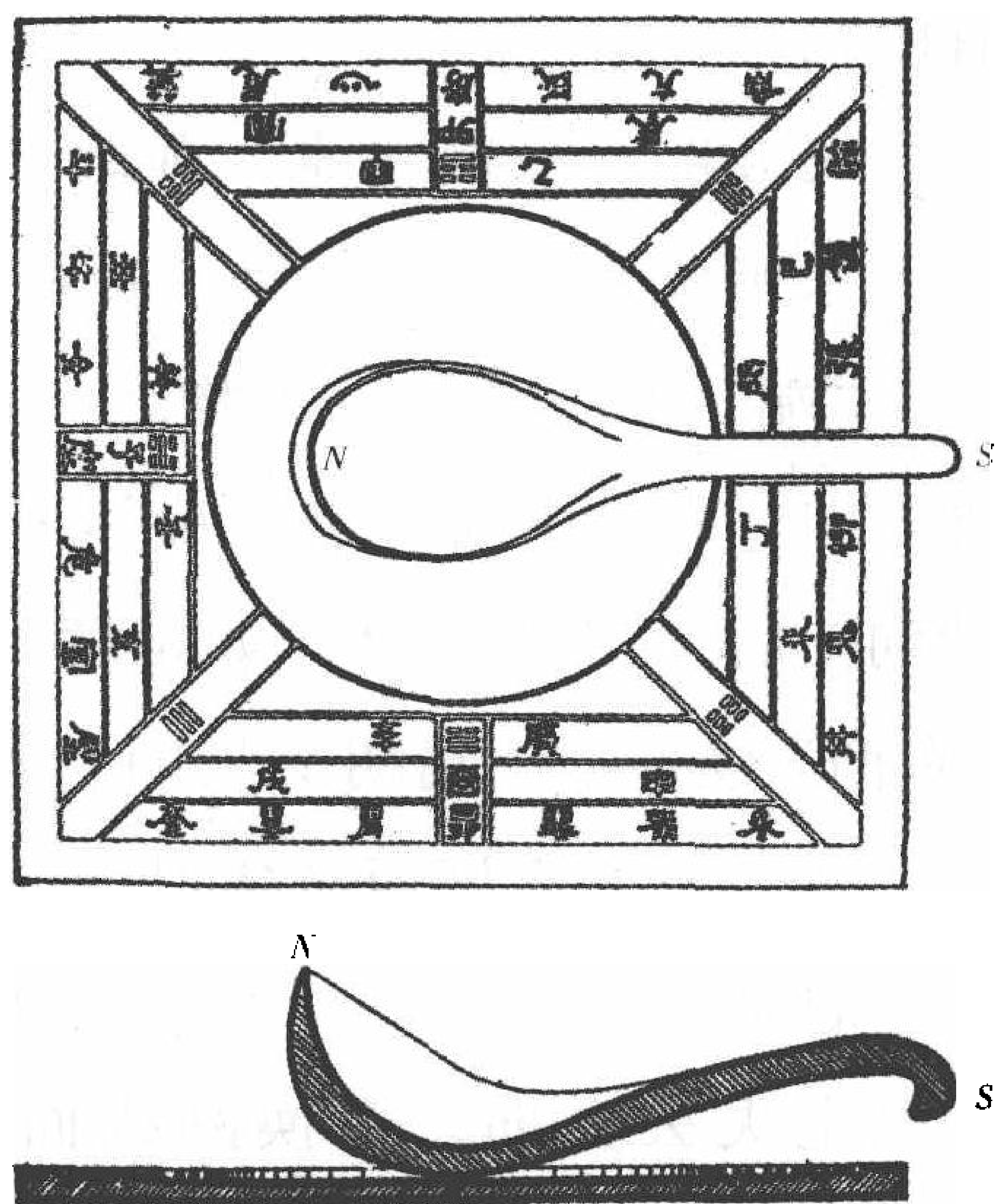


图27　王振铎复原司南
（上：俯视图；下：侧视图）

图27中曲线型杓式司南所具有的内在美，

曾为学术界所接受和赞赏，也成为今天媒体上中国科技事物的标志。

然而，也有个别不同意见：一者判定司南为天上北斗星座；二断其为西周官职。实际上，前者潜意识地受到复原司南为曲线型，且类似北斗星座的影响；后者查无实据。

问题的关键仍在科学方面。曲线型磁棒，尤其杓柄端的内弯，极大地减弱了作为“司南”这种磁棒极性，也就减弱它与微弱地磁场的彼此感应强度。

因此，即使在强磁场下制造的钨钢磁杓，在不长时间后也完全退磁而不转动了。解决这个问题很简单。王振铎在其大作《司南　指南针　罗盘》中，绘有汉代杓型14种，其中仅一二种为图27形状，而有多达11种为直柄（图28）。采用直柄杓形复制司南，甚而其柄端呈尖状，杓体不

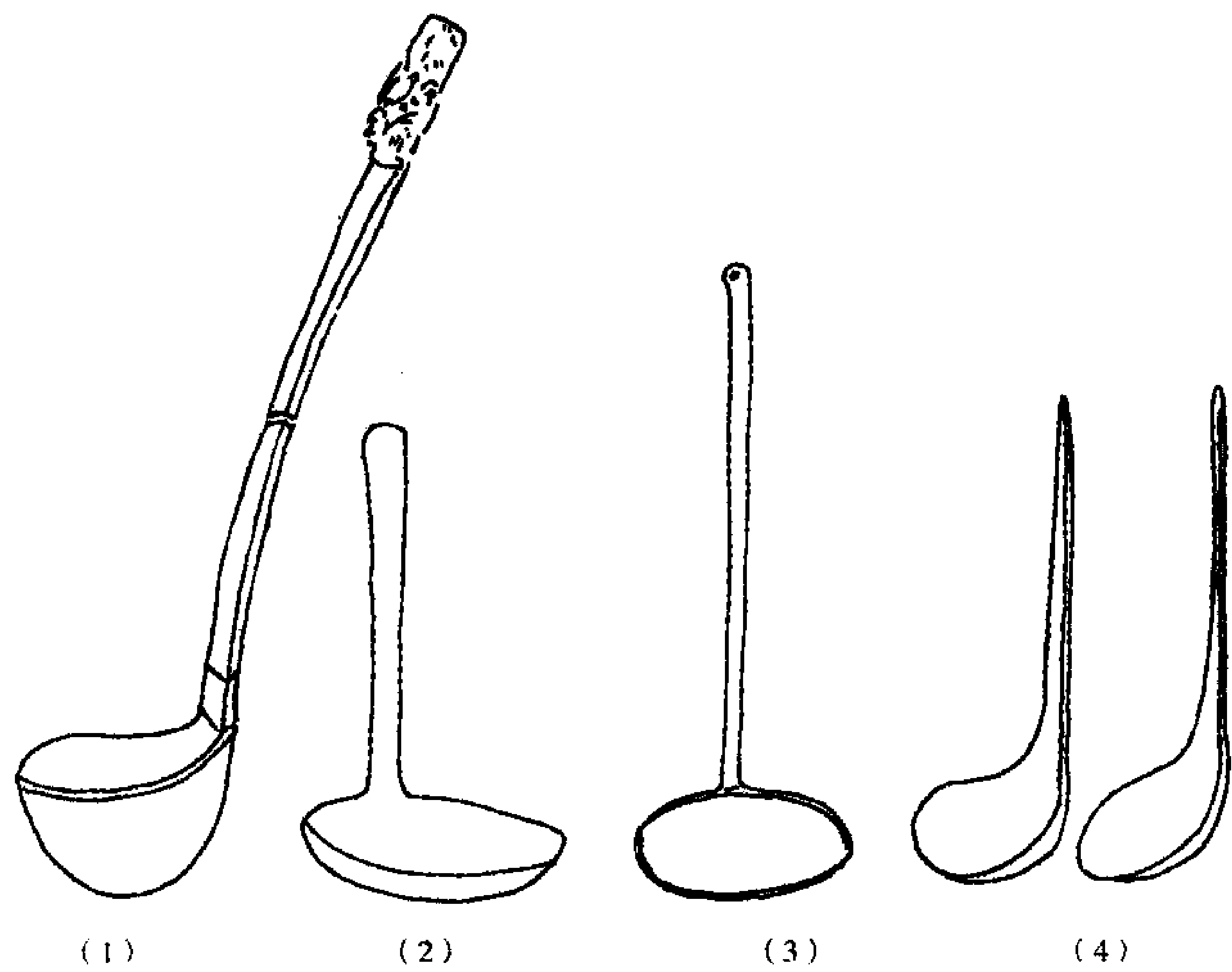


图28　汉代直柄杓四种

(1) 汉建元龙勺；(2) 洛阳铜勺；(3) 市北勺；(4) 汉匏斗勺

必挖空（图29），这样的磁杓实为一长条磁体，它完全符合“条形磁铁在自由悬挂时指向南北方向”的物理规律（图30）。将司南杓置于摩擦阻力极小的光滑平面上，与自由悬挂条形磁铁的物理条件是相同的。为减少摩擦阻力，复制的司南不宜大（图31）。要改变图27给人留下的仿似厨具大杓的印象。

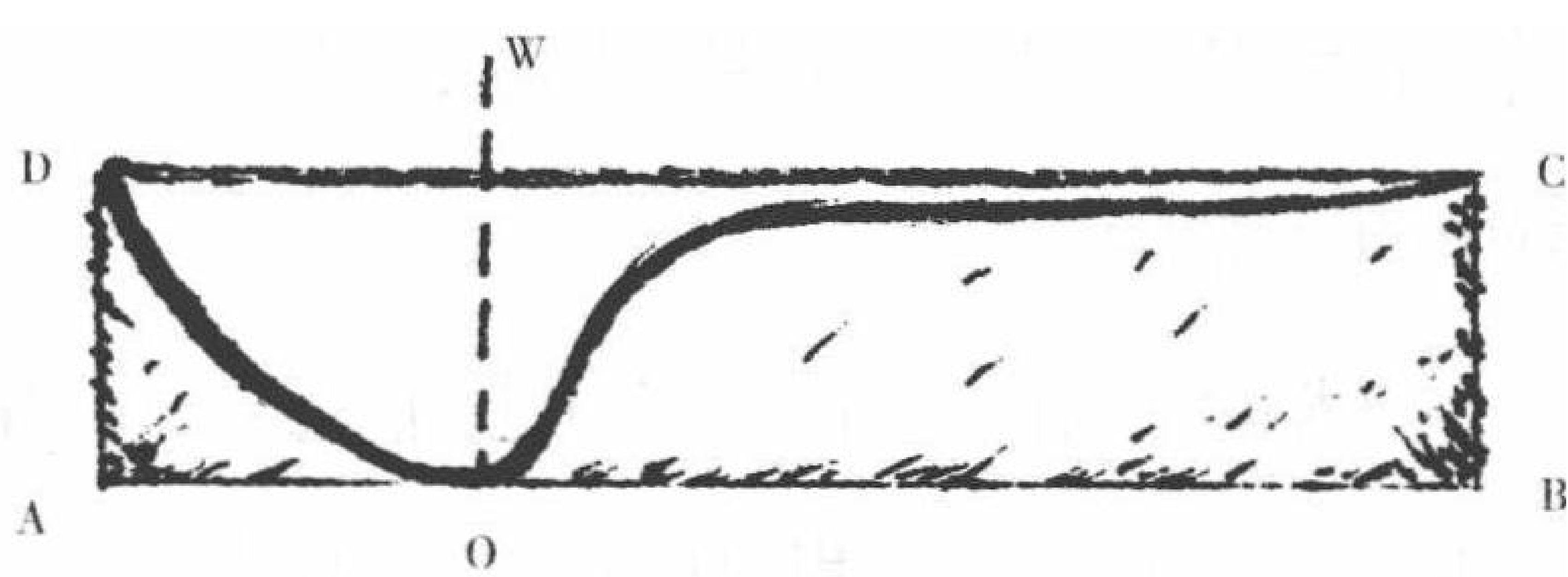


图29　重新复原司南杓草图
ABCD为天然长条磁铁，WO为杓DOC重心垂线

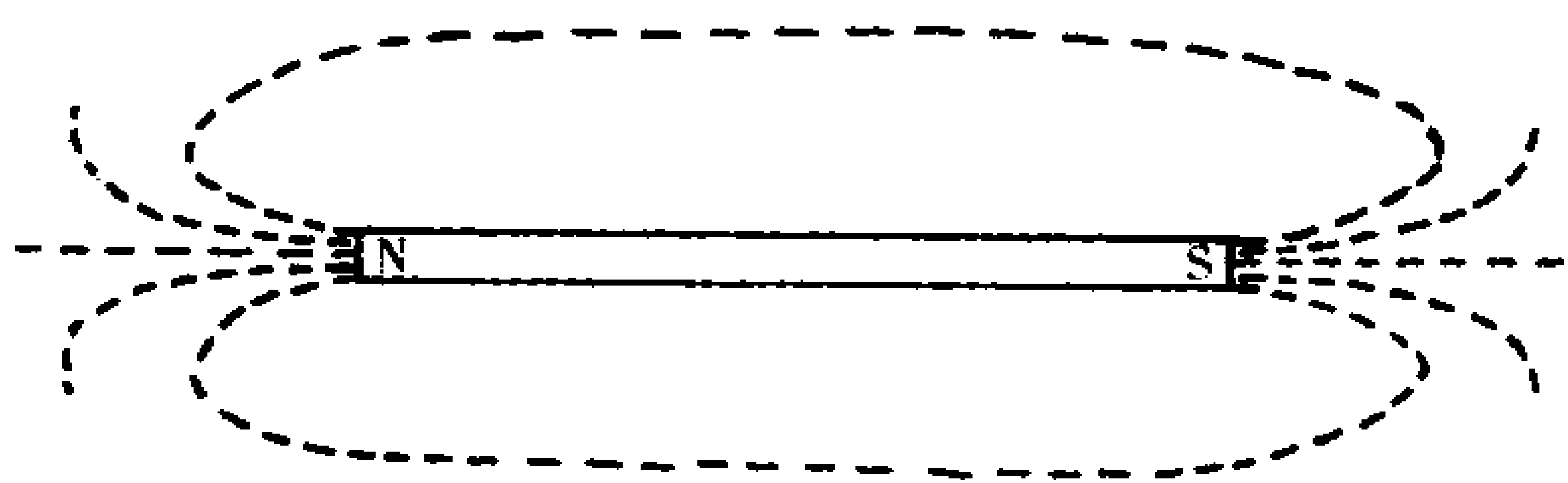


图30　条形磁铁的极性及其磁力线

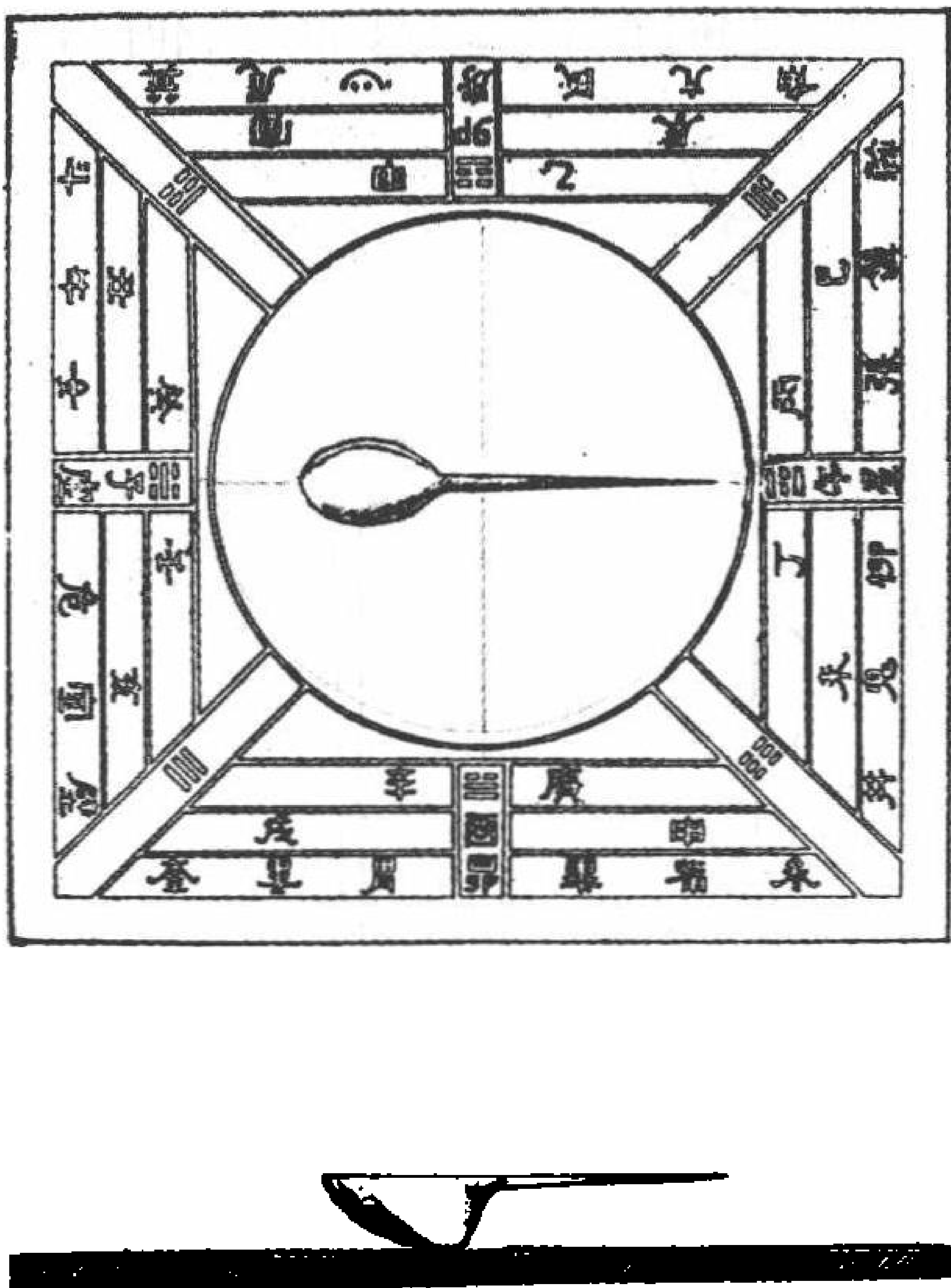


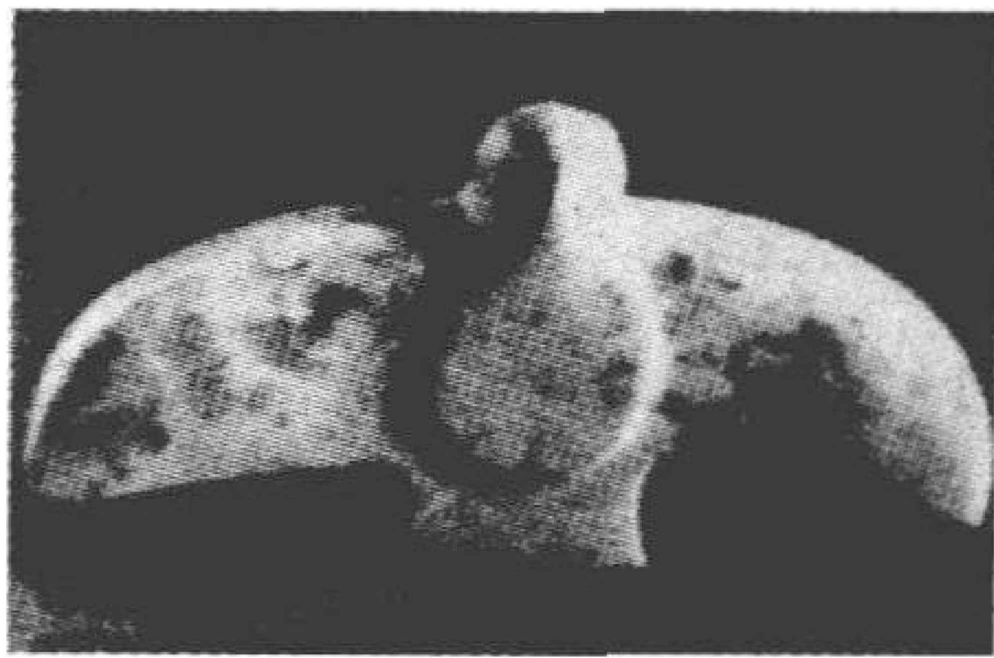
图31　重新复原后的司南及地盘图
（上：俯视图；下：侧视图）

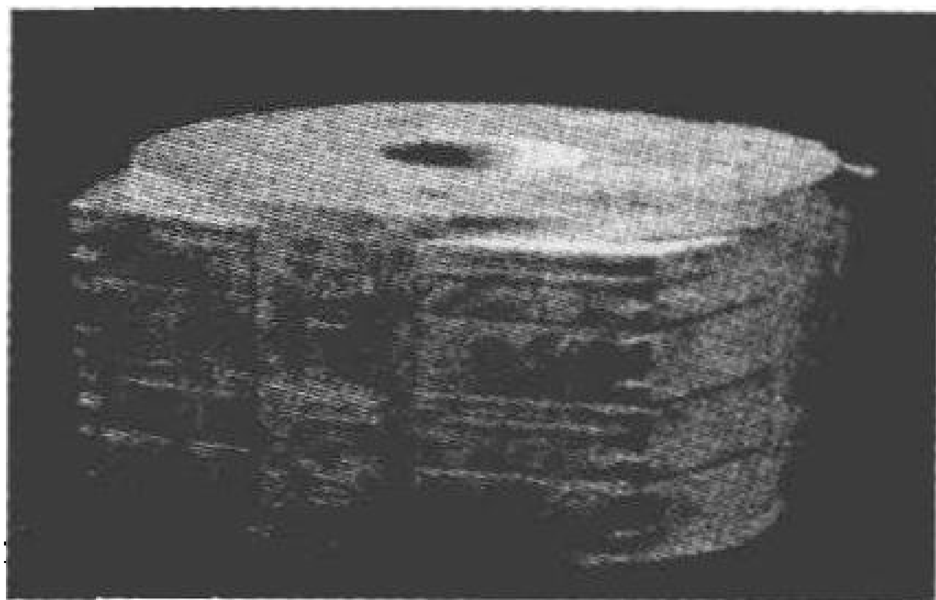
又有人疑问：为何考古界迄今未发现此类器物？这个问题，一当问祖先是否将它与主人入殓过；二当问从事考古之今人，在其发掘中有否司南之意识。众所周知，一个天然磁石杓在地下千余年，比一个铁钉更易锈蚀、剥离。若无此“司南”之意识，即使手触及其十次、百次，亦枉然也。

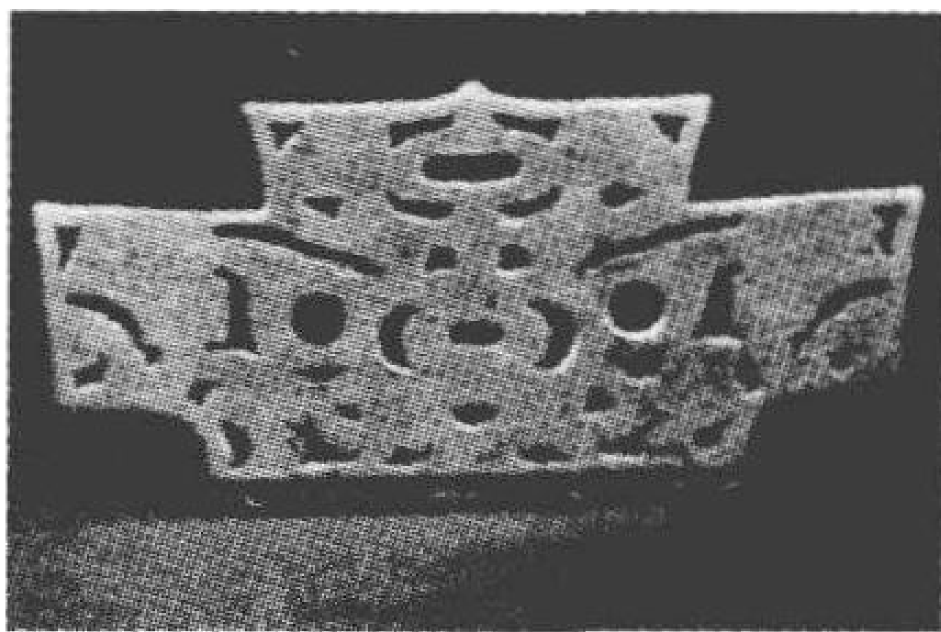
笔者相信司南在历史上存在过，且直到唐代指南针发明之前，可能有人“玩”过司南。梁元帝萧绎（508—554）在其《玄览赋》中陈述祖荣、嗟今叹古。言及他自己握大权，威风又享受。偶也思及被匈奴族赶到西北边陲的月支族。此时，他寄希望于占卜，“见灵鸟之占巽，观司南之候离”。其中，“巽”、“离”为八卦方位。唐代韦肇（766—779官中书舍人）在其《瓢赋》赞美瓢之素雅瑰伟，将其与“北斗”相比，与“司南”相较。写下“挹酒浆，则仰惟北而有别；充玩好，则校司南以为可”。

人们还担心古人雕琢天然磁石为司南的过程中，因敲打而令磁石退磁，担心他们有无适当的加工工具等。只要想想在浙江余杭县反山良渚出土约公元前2500年的诸多良渚玉器（玉鸟、玉龟、玉鱼、玉琮、玉冠饰等，见图32）就可以打消这些顾虑。参看以下莫氏硬度标（Moh's hardness scale）：

既然在汉代之前几千年，人们能以线切割等方法加工繁纹缛饰之玉器，汉代人何如不能加工比玉器软得多的天然磁石。要知慢工出细活，古人当有知晓不能在加工中以锤敲打者。


（1）玉　鸟


（2）玉　琮


（3）玉　饰

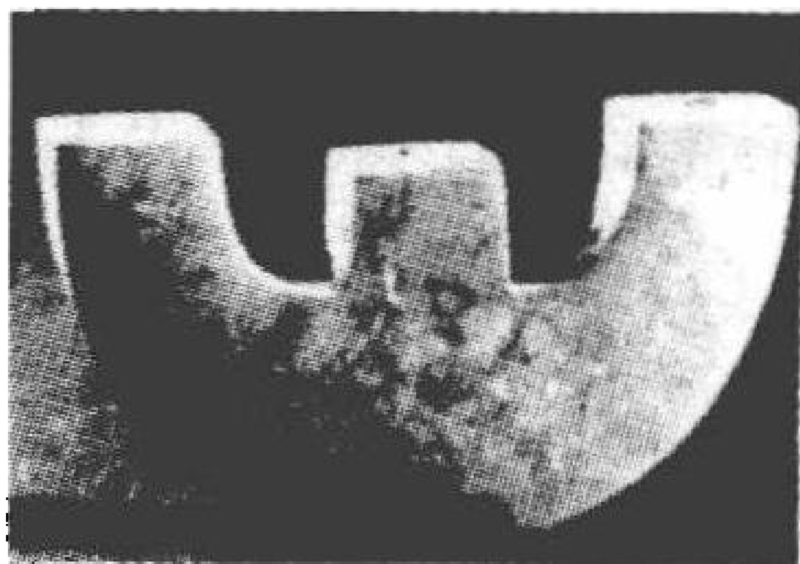

（4）山形符

图 32　反山良渚玉器

物　质	莫氏硬度
铁、天然磁石	5—6
钢	6—7
玉（软玉）	6.5
刚玉（翡翠）	9
金刚石	10

值得注意的是，1975 年之前几年，在墨西哥圣罗伦佐城（San Lorenzo）曾出土一根约公元前 1400—前 1000 年的磁棒，美国物理学家卡尔森（John B. Carlson）在《科学》（*Science*, *Vol*, 189, 1975, p. 753）上撰文提出，它“比中国人发现的司南要早 1000 年以上”。然，迄今为止，这个发现还是孤证，且在奥尔麦克（Olmec）文化中无任何文字或相关传说佐证之。中国司南仍是人类最早文字记述的磁指向器。

至于司南所放置的地盘（即今谓之方位盘），是秦汉时代占卜工具“式盘”之一部分。清末，人们曾发现汉代铜式盘（图33），20世纪70年代分别在甘肃武威县磨咀子和安徽阜阳市汝阴侯墓出土了汉代漆木式盘（图34）。式盘的上半部分称为“天盘”，上有28宿星名；下半部称为“地盘”，上有24向方位。天盘圆形；地盘为方形，以天干、地支和八卦中的部分文字表示东南西北等方位。其中，“子”、“午”分别为正北、正南向（图35）。有趣的是，明

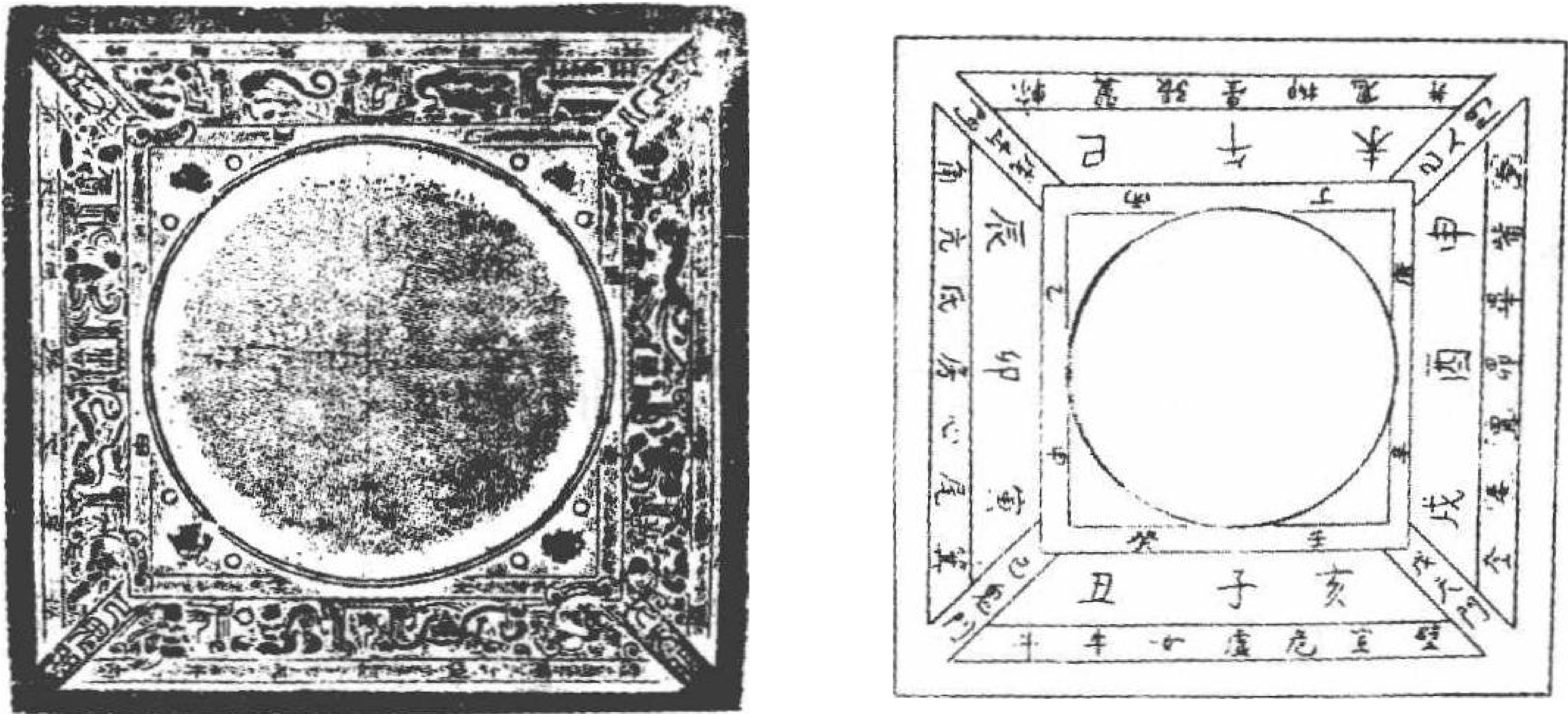


图33　清人发现的汉代铜式盘（左）及其方位示意图（右）

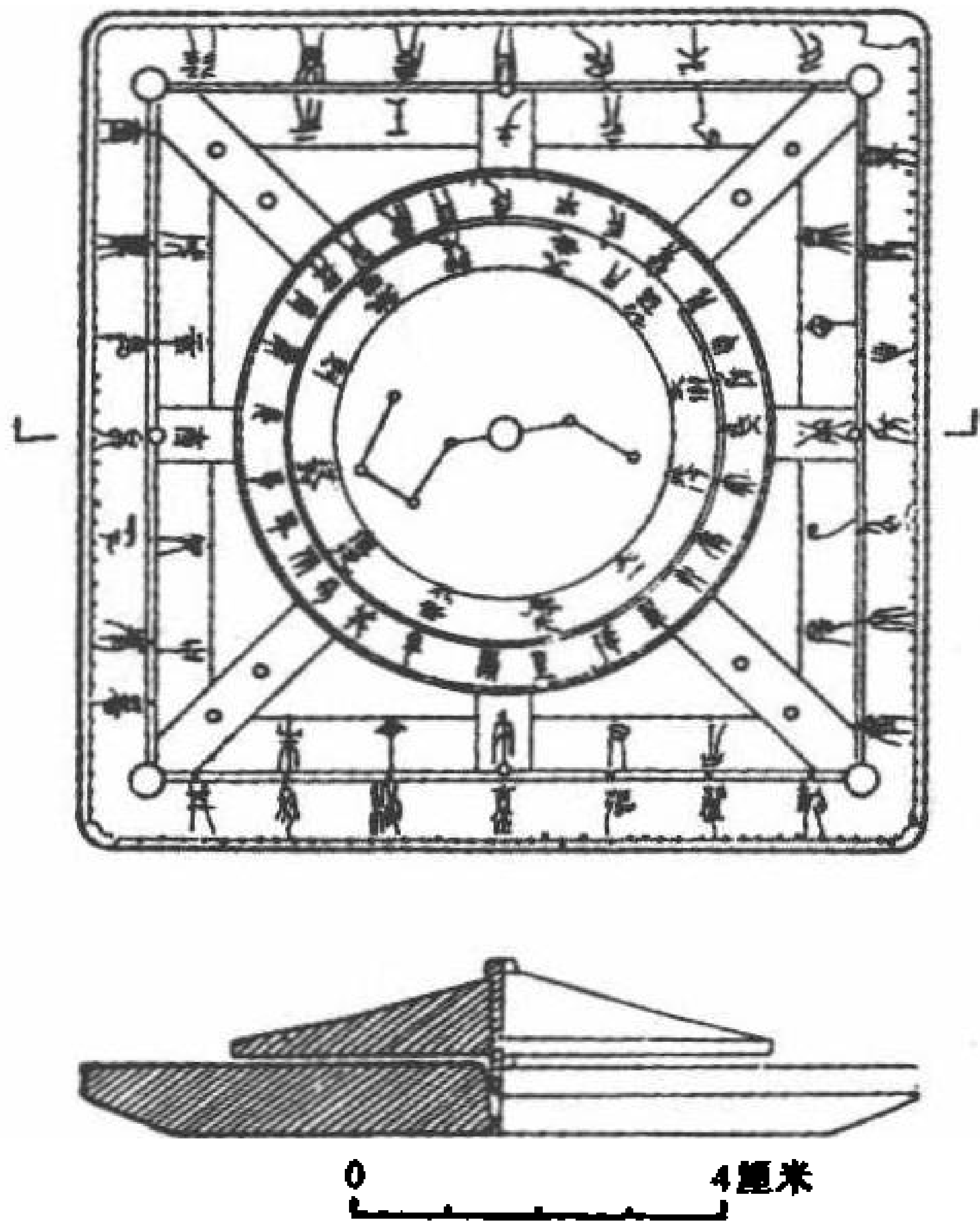


图34　武威磨咀子出土汉代漆木式盘

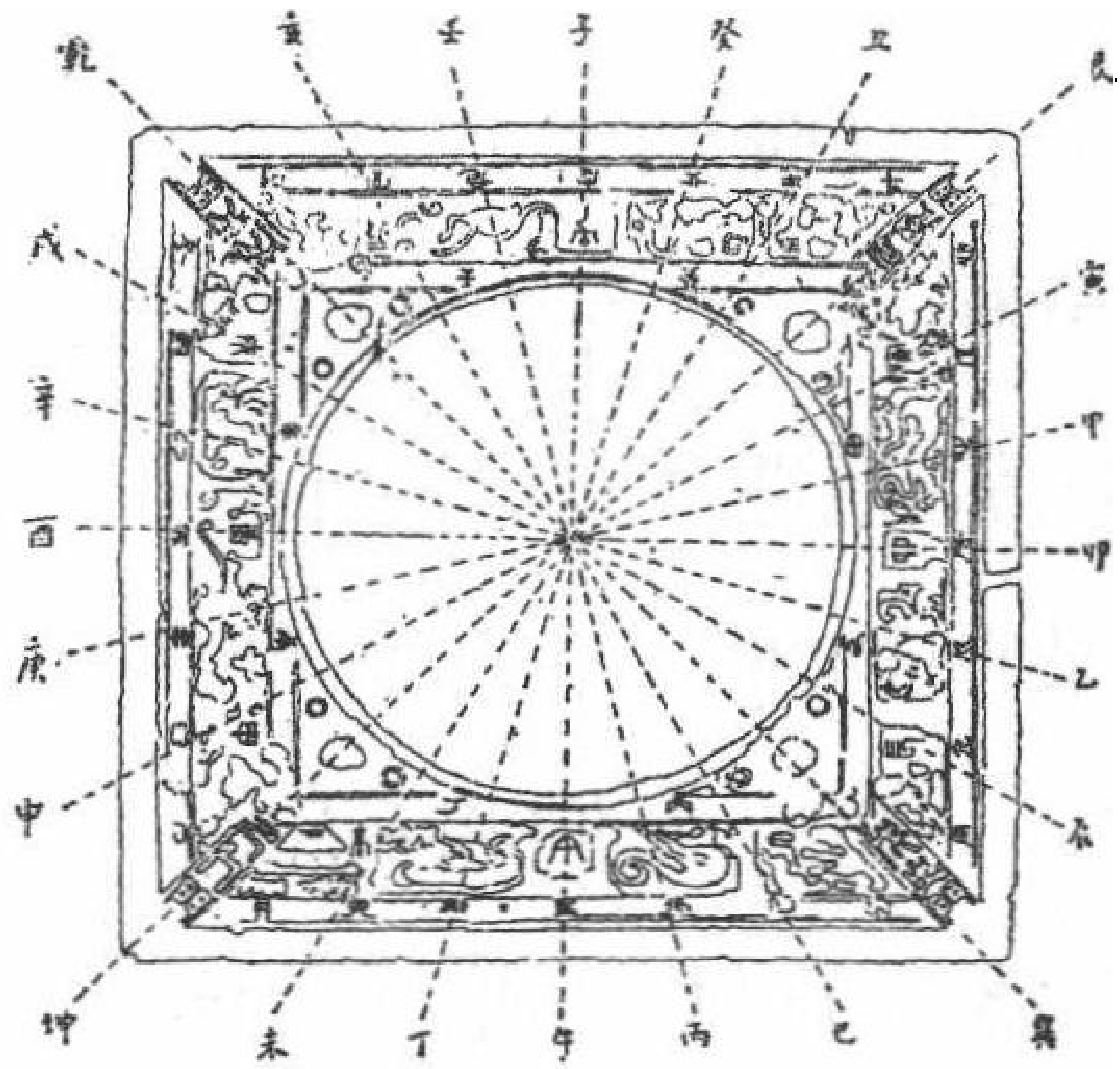


图35　式盘之二十四向方位

清以至20世纪初，安徽还是盛产罗盘之地，且称其为“徽盘”。地方传统如此长久，令人惊叹！

二　司南产生的社会文化与科学背景

秦汉时期产生司南当与其时社会文化相关：

第一，列国兼并，地域概念扩大；

第二，统一的中国，大地理观念的产生；

第三，占卜形式及其占卜工具的多样化；

第四，诸子百家的学术争鸣。

这几个纲目为读者所了解，我们要重点叙述司南产生的科学知识背景。

从技术上看，采矿与冶铁技术从战国到汉代有大发展，导致大量磁铁矿石的出现，乃至以其盛产而命名地域，如磁州、磁县、磁山。磁石被广泛用于医疗（磁石为本草药物之一味）、建筑（秦始皇用磁石筑阿房宫）、战争（晋朝大将马隆与羌戎作战，“夹道累磁石”，以吸引路过敌军之枪械）、炼丹（丹家对磁石之信仰实超过任一其他学派）、陶瓷制造（以磁石吸引上彩釉料中杂质铁粉）等，磁石的某些物理特性在各种典籍中得以记载。

初，人们将磁铁石写为“慈石”（《管子·地数》）。说“慈石召铁，或引之地”（《吕氏春秋·季秋纪·精通篇》）。“慈石为铁之母”，故引其子。慈、礠、磁，三字随时代而

变。汉初，淮南王刘安（前179—前122）学派对磁学多有贡献，且奠定了古代磁学知识的基础。

刘安家有食客上千人。在刘安主持下，共同编著了《淮南子》、《淮南万毕术》等书，其中记下了他们所做的各种磁铁实验。他们不仅仅知道磁铁的吸引性质，如“慈石吸铁”（《淮南子·览冥训》），“慈石上飞”（《淮南子·地形训》）。后者指大块铁吸引了地面碎小磁石，磁作用可以通过一空间距离发生。他们用长方形磁体做棋子，从而还清楚地知道条形磁铁具有不同的极性，即“慈石提棋”和“慈石拒棋”。“提”是吸引，“拒”是排斥。虽然他们尚未表达出磁体两极具有“异性相吸，同性相斥”的物理性质，但他们以“提”和“拒”二字活灵活现地描写了这种特性。不仅如此，他们还做了以磁铁吸引铜和陶土瓦石的实验，从而作出这样的结论：“慈石能吸铁，及其于铜则不行也”（《淮南子·说山训》），“若以慈石之能连铁也，而求其引瓦则难矣”（《淮南子·览冥训》）。这些文字看似平常，却又是难能可贵！它们显示了淮南王学派对自然知识的好奇心。对这些实验结果的解释只有在近代磁学诞生以后才有可能。这就是近代磁学描述物质磁性的磁导率 σ 的概念：

$$\sigma\begin{cases} >>1 \cdots\cdots\cdots\cdots\text{铁磁性物质} \\ >1\text{（略大）}\cdots\cdots\text{顺磁性物质} \\ <1 \cdots\cdots\cdots\cdots\text{弱磁性物质} \\ \text{负值}\cdots\cdots\cdots\cdots\text{抗磁性物质} \end{cases}$$

铜是抗磁性物质，故不被磁吸引；瓦石土之类，是弱磁性物质，故难被磁所吸引。

不可忽视的事实是，刘安及其门客们发现了长条磁石的指极性。所谓“指极性”，是自由转动的磁体在静止时指向地球的南北两磁极。因为地球是一个巨大的磁体。刘安的发现不仅提供或解释了制造司南的科学知识的基础，也令本章开篇中那张知识与技术对应表完整化。《淮南万毕术》写道：“慈石悬入井（或为‘室’），亡人自归。”

汉代高诱注曰：“取亡人衣，裹慈石，悬家（或‘井’或‘室’）中，亡者自归矣。”

括号内的个别字不同，是不同版本所致。“亡人”、“亡者”均指走失的人。家里出现此情，则在家中悬吊起磁石，以为亡者指出方向，平安回家。这或许是刘安门客中道术家的信念。这里关键是，只有自由悬吊的长条形磁石才具有方向性，并非人们通常想象的一块多棱多角的无规则形状的磁体。将长条形磁石外包裹衣服，再悬吊于空中，这是古代科学穿上巫术外衣的典型事例。汉以后，发展出大量的磁幻术（或磁游戏），其本质概莫如此。

最为令人惊讶的是，刘安学派在历史上最早发现了造磁体的方法：“取鸡血、杂磨针铁杵，和磁石，（涂）棋头，置局上，即自相抵击也。”（《淮南万毕术》）

高诱注：“取鸡血与针磨，捣之以和磁石，用涂棋头，曝干之，置局上，即相拒不休也。”

这两段引文中“杂磨针铁杵”或“针磨”，是指磨锉钢针时在钢锉下掉落的碎粉。俗语云，“只要人用心，铁杵磨成针”。“鸡血”是凝固剂，用它“和磁石”的“和”，读 huò，与“和灰浆”、“和药”同义。总是坐在一个方向上磨锉针尖，其粉末在地磁场作用下天然具磁性。将这种粉末与鸡血和成磁石，涂在棋子两端，棋子就成磁体，置于棋局上则“自相抵击”。两棋相“抵”即彼此吸引，相“击”即彼此排斥。

将磁石作成棋子，或人造磁性棋子，在汉代初期曾盛极一时。以这样的棋子摆局，就称之为“斗棋”。斗棋决定于棋子磁性的强弱。强者将对方棋子吸引过来或排斥在一边，于是为胜方。汉武帝曾多次召方士栾大进宫，为其表演斗棋术。淮南王刘安是汉高祖之孙，汉武帝之叔父。因其“辩博善为文辞”，武帝“甚尊重之”，“每宴见，谈说得失及方技赋颂，昏暮然后罢”（《汉书·淮南王传》）。他很有可能对汉武帝讲过人造磁性棋子及斗棋等事。然，武帝初无子，刘安遂有篡逆之心。刘安爱女名陵，聪慧且善逢人说话。刘安暗遣其入长安，刺探宫情，约结宫中左右。后谋反事泄，刘安家属并食客数千人被诛。一个在历史上对磁学发展有极大贡献的学派就此终结。从韩非子到刘安、王充，中国人制造了司南，且知晓长条磁铁的指极性。从而构架了整一个时代完整的磁学知识。此后，中国磁学的又一次大发展，尚待唐宋年间大批堪舆家问世。

三　指南针

将普通钢针磁化，是本草学家的贡献。进一步，将磁针作为方向指示器而称为指南针，是道家和堪舆家的共同杰作。堪舆家又进而改进、发展了方位盘，使罗盘复杂化。

磁石作为安神醒脑的一味中药，其质地早为本草家所关注。鉴别其优劣的方法即是视其吸引多少钢针。萧梁朝陶弘景（456—536）的《名医别录》曰："好磁石能悬吸针，虚连三、四（针）为佳"。梁朝或隋初，道家苏元朗在《太清石壁记》中亦说："磁石但取引针相连五、六者为良，连针唯多最好。"唐代苏恭《唐本草注》指出，"初破（磁石）好者能连十针"。

以此鉴定磁石质地，也即发现了磁感应法令普通钢针磁化。继而发现磁针的指向性是科学史之必然。据今发现，记述指南针之较早者，为生活于晚唐的段成式（803—863）。段曾官秘书省校书郎，太常少卿，于武宗会昌三年（843），邀数位同僚并道者"昇上人"游长安诸寺。游兴，数人共作连句辞赋，其中昇上人有"勇带磁针石，危防丘井藤"句，段成式吟"有松堪系马，遇钵更投针"句（《酉阳杂俎》卷五《寺塔记》）。显然，他们出游时身带有磁石、磁针，并且在盛水僧钵中试放针体，察其指向。这也是水浮指南针的较早记载。

在段成式之后的约200年，即11世纪40年代，就像知识大爆炸一样，指南针，更确切说是罗盘，几乎同时被以下三种著作所记录。

一是王伋注《管氏地理指蒙》。该书集唐宋间堪舆著作而成。注者王伋（约988—1058）字肇卿（也作赵卿）。他在约1030—1040年为之作注，书中留下其作《针法诗》一首：

虚危之间针路明，南方张度上在乘；

坎离正位人不识，差却毫厘断不灵。

“虚、危”，“坎、离”，“张”是罗盘上方位。它们分别指正北、北偏西、正北、正南、南偏东（图36）。诗中还有一个方位“南”。该诗分明指出指南针的两端，一在“虚危”之间，即北偏西；一在“南方张度”，即南偏东。磁针方向与地理正南北方向之间夹角，今日称为磁偏角。磁偏角的大小随地理位置和具体年代而变化。由图35可知，《针法诗》所描述的这个偏角约为7.5度（北宋国都汴京所在地）。罗盘与磁偏角同在一诗中表达出来了。

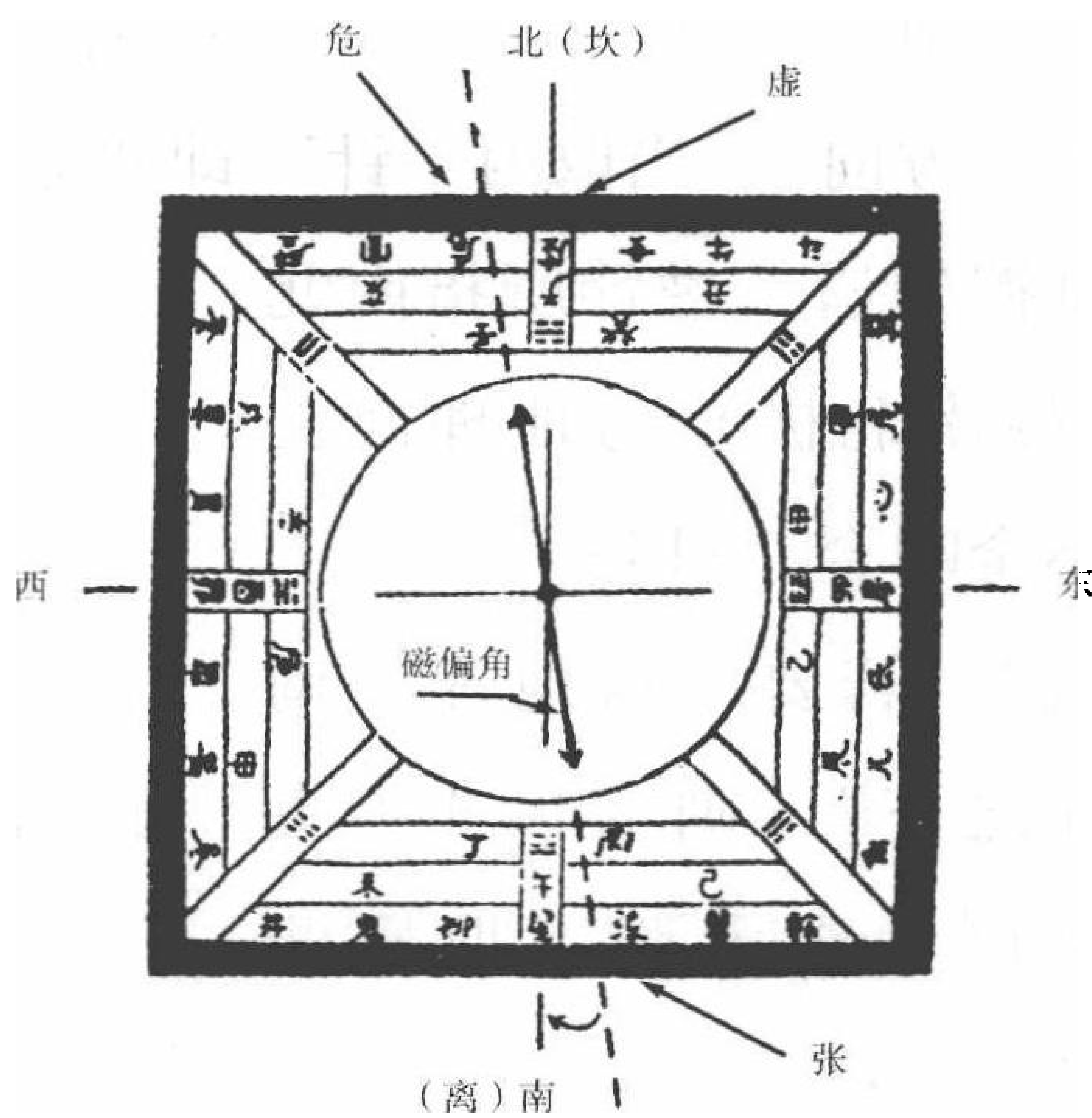


图36　罗盘与磁偏角图示（此盘面为汉代式盘）

王伋是当时闻名闽赣的堪舆师。其父王熙元（961—1081）、祖父王处讷（915—982）在《宋史》中均有传，且通晓“星历、占候之学”。王伋的堪舆术本是家传。

二是北宋杨维德的相墓书《茔原总录》，书成于仁宗庆历元年（1041）。该书卷一“主山论”写道：

> 客主取的，宜匡四正以无差，当取丙午针，于其正处，中而格之，取方直之正也。……取丙午、壬子之间是天地中，得南北之正也。丙午约而取于大概。若究详密，宜曲表垂绳……

引文中第一句“的”字，指目标；“四正”即东西南北四个方向。“当取丙午针”即罗盘上磁针指向，如图 37。杨维德知道，磁针所指南北（磁南北极）与地理南北不全吻合，只是“约而大概”。若要取得地理“南北之正”，则需以圭、臬等仪具在太阳下取影测知。整段文字表明，杨维德熟知罗盘与磁偏角。所谓“丙午”或“丙午、壬子之间”，也表示当时北宋京都磁偏角约为 7. 5 度。

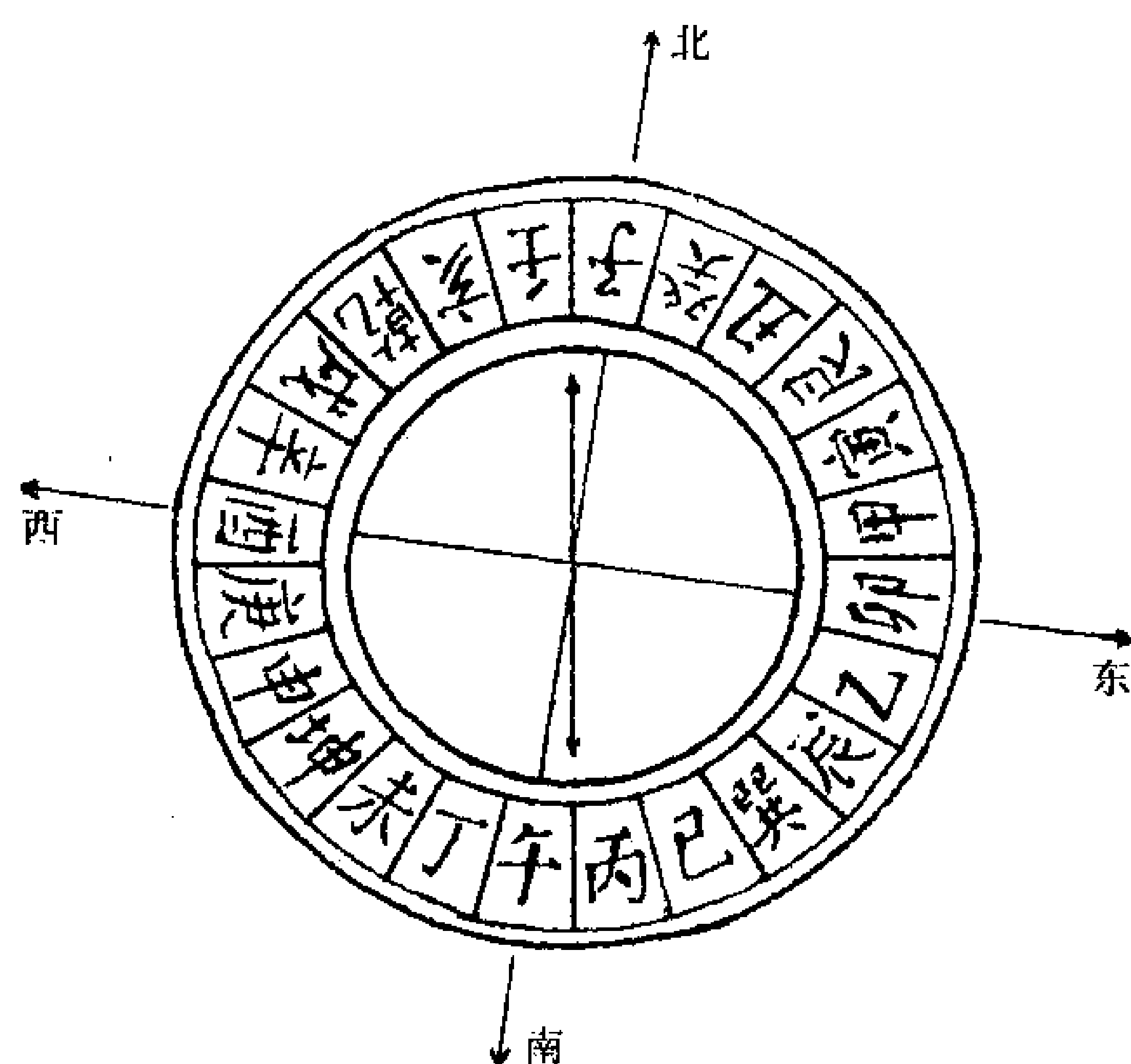


图 37　罗盘之丙午针

杨维德其人是宋代重要天文学家，年轻时曾是韩显符（940—1013）造铜浑天仪的助手，官“保章正”；后官“司天春官正”，于景祐元年（1034）编制星表而闻名，并

与天文机械制造师燕肃（961—1040）一同奉诏检测莲花漏；他还是今日闻名天下的1054超新星的发现者和忠实观察记录者之一。他又是一位阴阳家，著有“遁甲符应”类著作。似是晚年，又发阴阳于风水地理，写成《茔原总录》一书。“茔”即坟地。

三是北宋兵家曾公亮（999—1078）著《武经总要》（1040—1044年成书）。

前述道家、堪舆家以磁感应方法制造指南针，而曾公亮发现了另一种造法。这种方法，以现代科学语言，利用钢铁从炽热到淬火冷却过程中，磁畴（magnetic domain）从无序（magnetic disorder）到有序（magnetic order）的转变。他写道：

造指南鱼法：用薄铁叶剪裁长二寸、阔二分、首尾锐如鱼形。置炭火中烧之。候通赤，以铁钳钳鱼首出火，以尾正对子位（北），蘸水盆中，没尾数分则止。以密器收之。用时，置水碗于无风处，平放鱼在水面令浮，其首常南向午也。(《武经总要前集》卷十五)

对这种造法要作一点近代磁学知识的解释：将钢铁片剪成鱼形，即常见的二头尖的长条形铁片。将其置于约摄氏700度高温（此温度称为磁体的磁畴达到混乱状态的居里点），其磁畴排列完全被打乱。此后又将其顺地磁场方向（“尾正对子位”，即南北方向）淬火、冷却，此钢片磁畴便又按地磁方向重新排列为磁有序状态，从而产生磁性。鱼尾对北，则成为南极；鱼头朝南，则成为北极。因此，这

种鱼形指南针“首常南向午”。“南向午”，非正午（南），又一次讲出磁偏角的存在。

由上可见，人们发现了两种磁化钢铁的方法。罗盘和磁偏角也为人们所掌握。

继而，沈括在《梦溪笔谈》和《补笔谈》中对其之前有关指南针和磁偏角的知识作出了总结。他说：

方家以磁石磨针锋，则能指南。然常微偏东，不全南也。

予家指南，指北者皆有之。

以磁石磨针锋，则锐处常指南，亦有指北者。

他还指出了指南针的多种安装法。除水浮之外，特别道明以蚕丝悬吊磁针（图38），称为缕悬法。1777年，法国科学家库仑（C. A. de Coulomb，1736—1806）以此方法设计船用罗盘而获法国科学院头等奖；他所发明的“库仑扭秤”，也是用的沈括的这种方法。

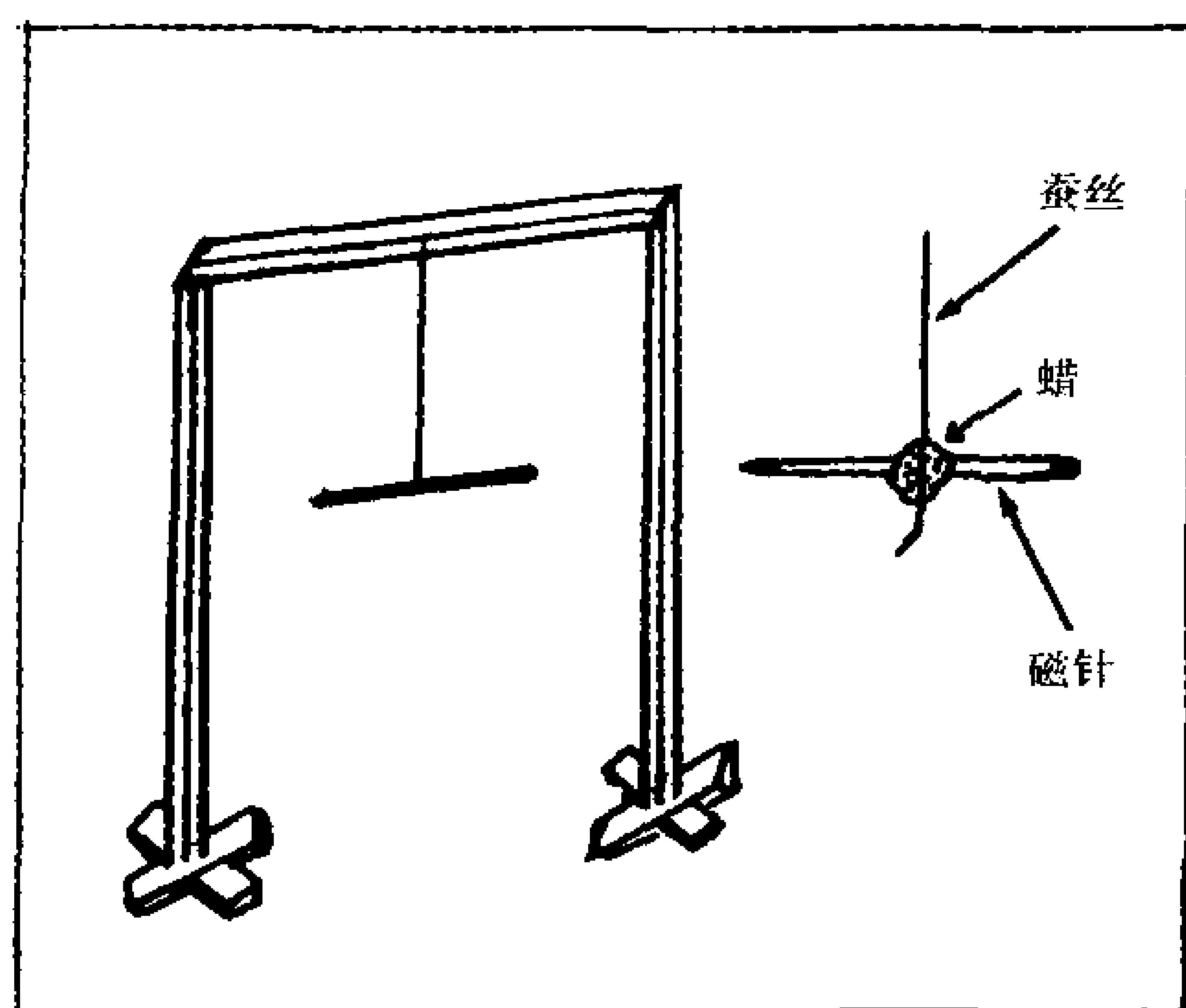


图38 沈括的缕悬法

以水浮指南针事，在无风、轻放之时，鉴于水的表面张力，铜针或铁片可一时浮于水面。然古人“以针横贯灯心（草），浮水上”（寇宗奭《本草衍义》卷五《磁石》）。水罗盘多以此法行之。

指南针、罗盘从宋代起累见文献记载，罗盘也开始用于航海导航。从会昌三年（843）段成式记述指南针起，到沈括《梦溪笔谈》成书（约1090），指南针与罗盘获得极大发展。

四　罗盘与堪舆

罗盘的盘面，最早无疑是来自式盘中地盘。如图39，是成书于隋唐时期《黄帝宅经》中的地盘图。前所引图36是仿汉代式盘绘成的。它们中央为一方口或圆口光滑平面，磁针置此面上，会因地磁场作用而自由转动，并静止在南北方向。这是早罗盘的肇始。若在此装上一水池（堪舆家称此池为“天池”）以放下磁针，它就是水罗盘。方形罗盘不便观察，于是将其改为圆形。宋初许洞（980—1011）著其书《虎钤经》，成文于宋真宗景德元年（甲辰年，1004），景德二年（1005）进献朝廷。该书《占鸟情》篇绘有方形和圆形两种方位盘（图40），其中圆形十二方位盘面当是从方到圆转变时期的一种罗盘。罗盘

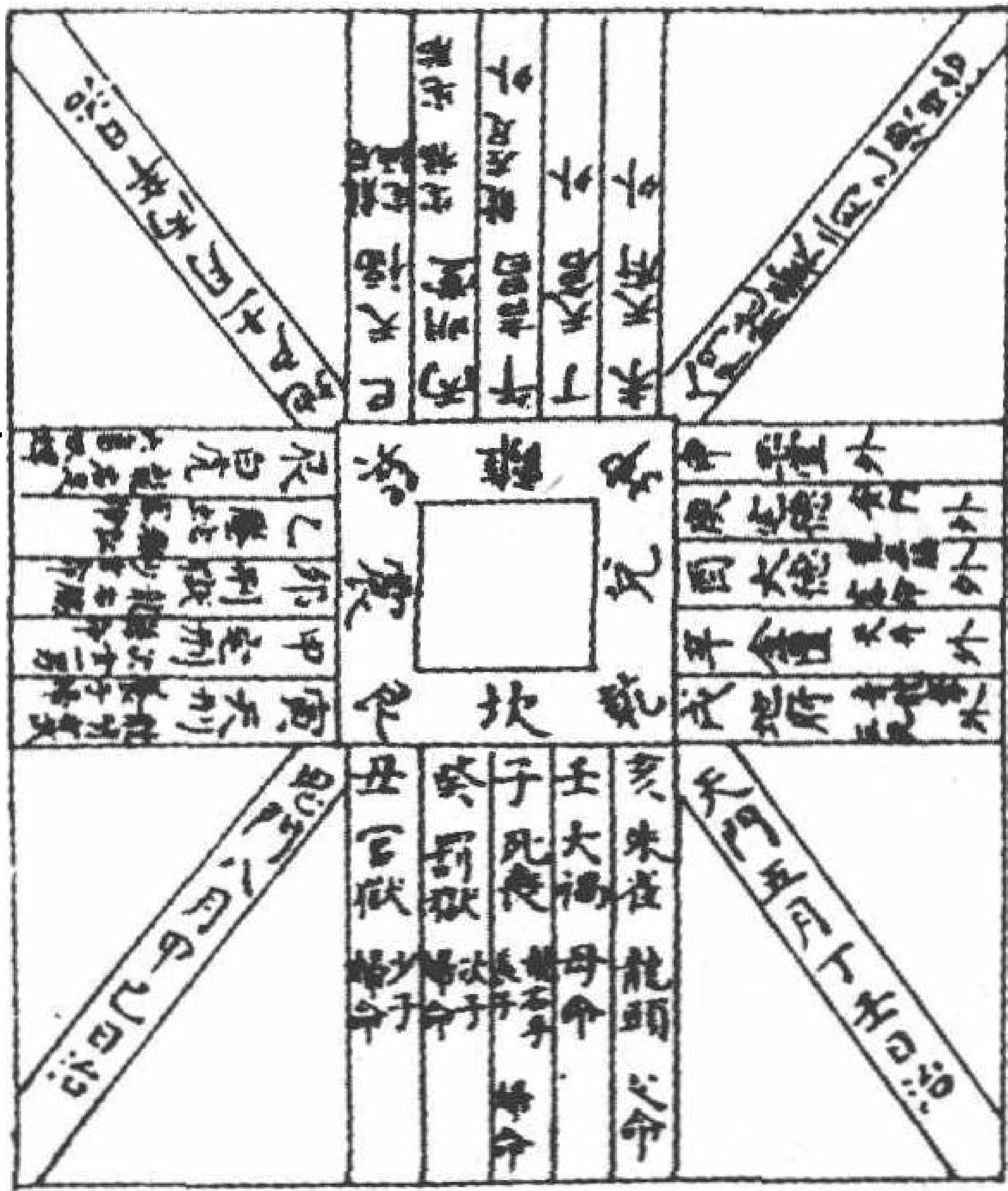


图39　《黄帝宅经》绘地盘图

从方形到圆形，也是仪器史上一大革命。许洞在《虎钤经序》指出，该书“或作于己见，或述于古人”，“六壬遁甲，星辰日月，风云气候，风角鸟性，虽远于人事，亦不敢遗漏焉”。这两种形式的罗盘当为许洞之前人所为者。

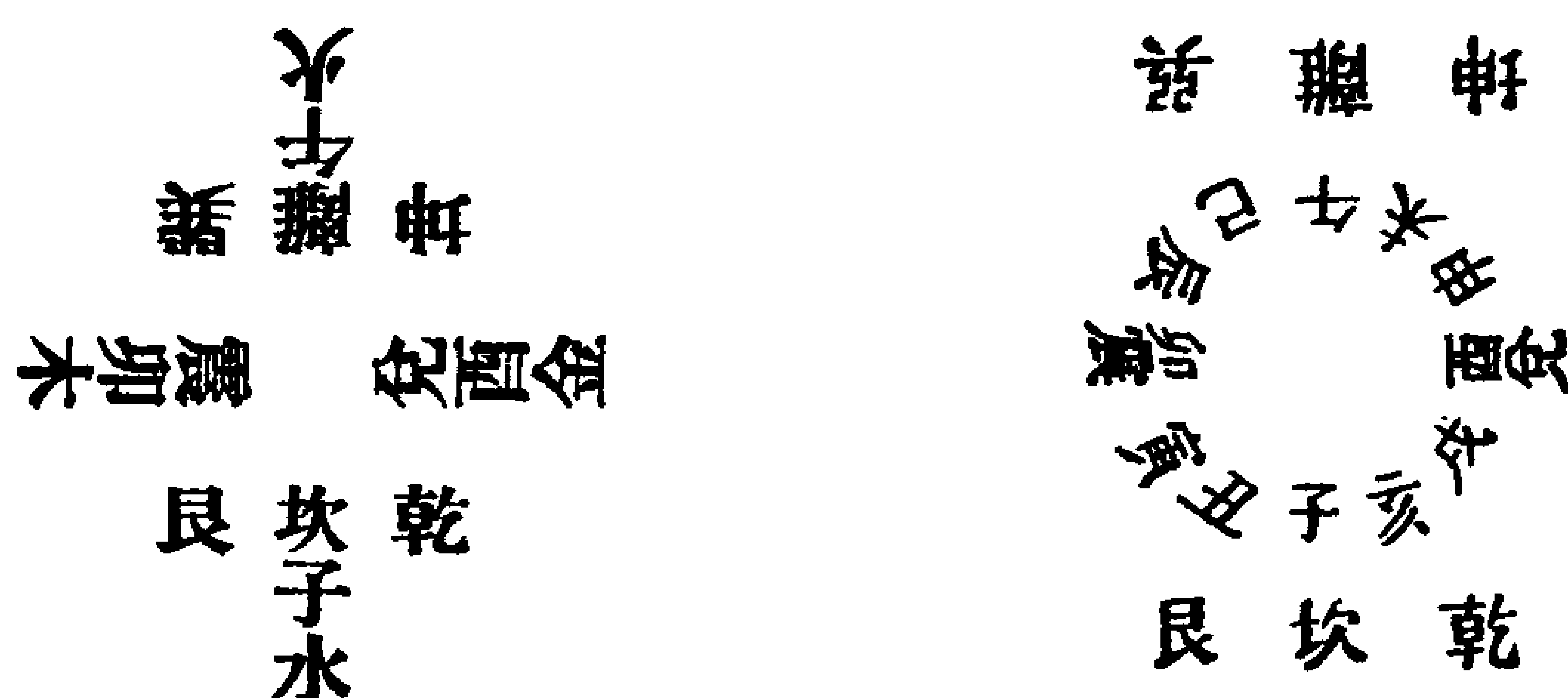


图40 《虎钤经》绘方形八卦盘（左）和圆形十二地支盘（右）

一旦堪舆家手握罗盘，其信念也必定纳入其中。由宋人集堪舆著作而成的《九天玄女青囊海角经》中绘有一水罗盘（图41），且称其为“浮针方气之图”：中央天池，放磁针；第二、三层为十二方位圈或称十二向；第四、五层为二十四向。被明、清两代尊为仙人的唐晚期堪舆师杨筠松〔又称杨救贫，于“黄巢破京城，乃断发，入昆仑山步龙”。即在唐僖宗中和元年（881），也即段成式记述磁针之后40年入山专行堪舆业〕曾在其作《青囊奥旨》中言及“先天罗经十二位，后天方用干支聚”。图41留下罗盘方位逐渐细致的历史遗迹。明代吴望岗在《罗经解》中绘下一个罗盘图，称为罗盘“三针总图”（图42）。它将图40的五层圆圈扩展到七层，每层都有名称。显然，二层、四层之

方向标示与图40同；三层的24向称为“正针”，它与图41第五层相同；五层的24向称为“杨公缝针”（“杨公”即杨筠松），它与图41的第四层同；六层以天星表示方向，为宋明间堪舆师所添加；七层称“赖公中针”。“赖公”其名为赖太素或赖文俊，南宋初年人，活跃于12世纪。罗盘上“三针”（正针、缝针、中针）绘图，表明堪舆手段与目的之逐日繁琐、变化。缝针、中针的子午向与正针之偏离，也有可能与历史上地磁极与地磁偏角的变化有关联。



图41　浮针方气之图



图42　罗盘三针总图

自宋以降，堪舆罗盘被风水地理师神秘、复杂化了。八卦、干支、天星，甚而占卜吉凶、术语等全绘在盘面上（如图43、44、45）。

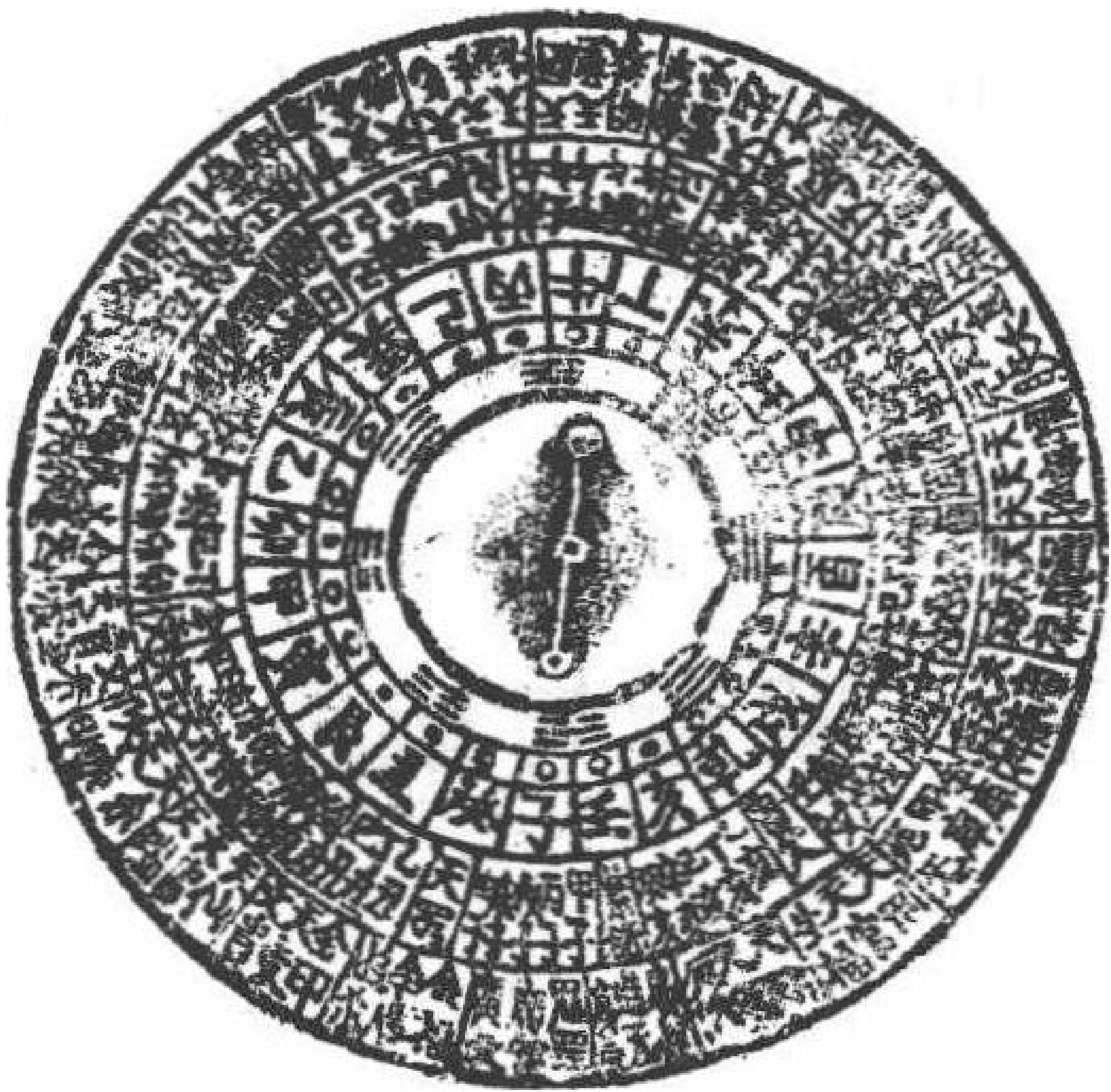


图43　元代堪舆铜罗盘

以上所述，均为堪舆用水罗盘。值得注意的是，旱罗盘也是

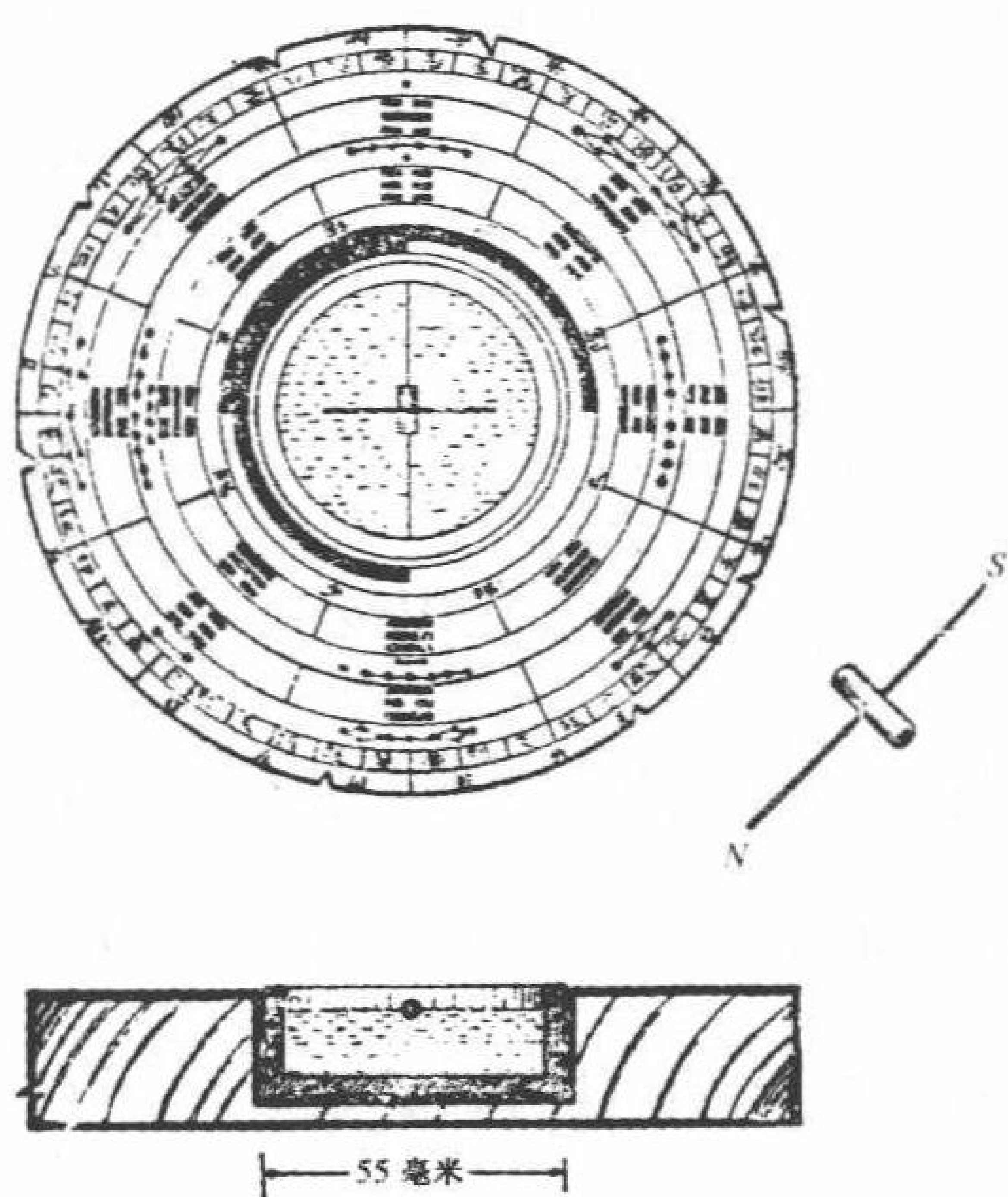


图 44　清代堪舆水罗盘

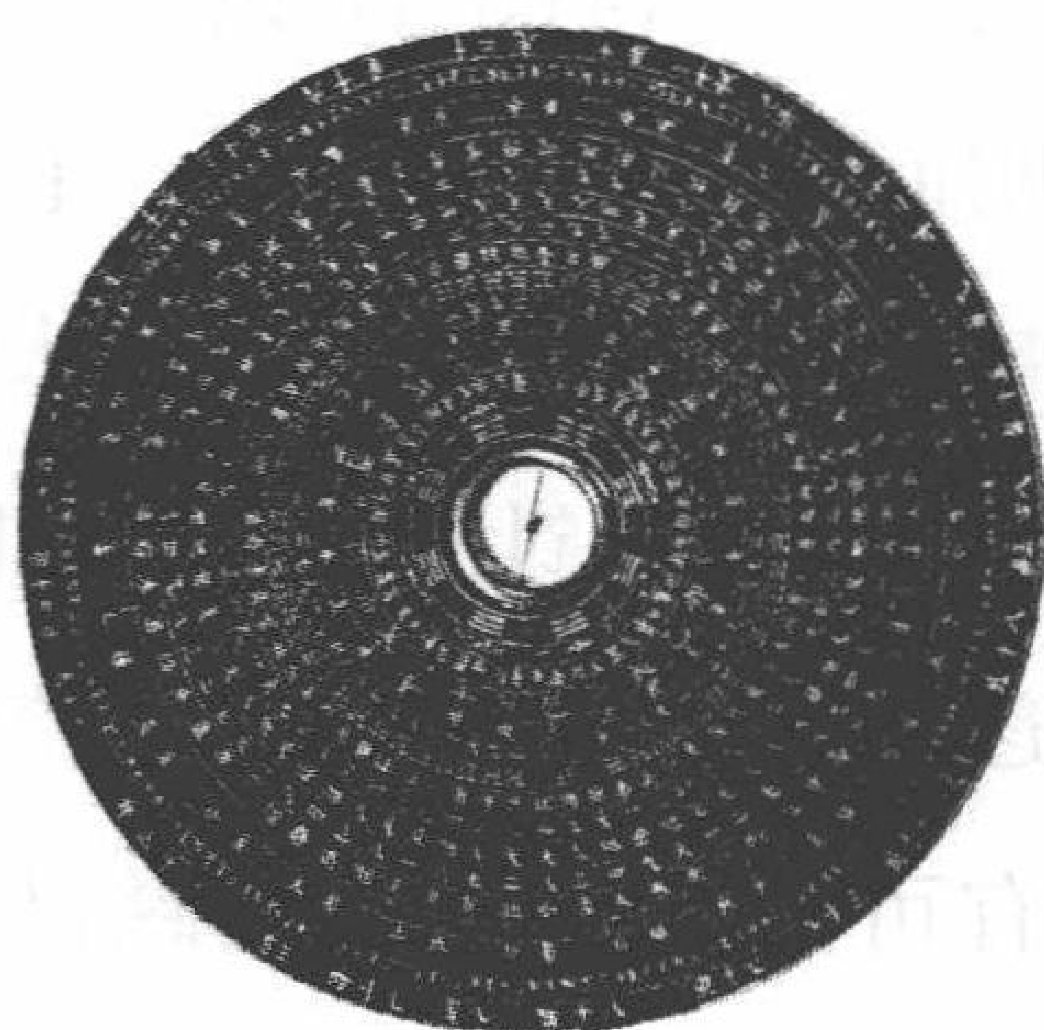


图 45　近代堪舆旱罗盘

中国人最早发明并用于堪舆。20 世纪 80 年代，在江西临川县宋墓中出土一具“张仙人瓷俑”（图 46）。该俑右手竖持罗盘置于左胸前，且可见其磁针中央有枢轴式接孔。墓主人为南宋邵武（今属福建）知军朱济南，卒于庆元三年（1197），葬于庆元四年（1198）。旱罗盘曾于 12 世纪下半叶流行于闽赣地区，当无疑议。



图 46　江西临川宋墓出土“张仙人瓷俑”

五　罗盘与航海

在 11 至 12 世纪之交已有文字记述航海用罗盘导向。宋代朱彧《萍洲可谈》描述舟师“夜则观星，昼则观日，阴

晦观指南针”。是书完稿于宣和元年（1119）。然，朱彧父亲朱服于元符二年（1099）至崇宁元年（1102）官广州帅，是书多述其父所见闻。由此可断，航海中罗盘导向应为11世纪下半叶事。继朱彧文字之后4年，徐兢于宣和五年（1123）奉命出使高丽，亦述及过洋之日“若晦冥，则用指南浮针，以揆南北”（《宣和奉使高丽国经》卷三十四）。以指南针识方向，非罗盘莫属。

仅是阴晦之日观指南浮针或水罗盘，乃因晴朗之日尚可用“牵星术”辨方向。“牵星术”即以某种简便工具观测北极星高度。历代海上航行，舟师多积累相关知识。罗盘，作为一种新仪器导航，自然也尚需积累相关经验与知识。13世纪初，罗盘导航终于全天候使用。赵汝适（1170—1231）于宝庆元年（1225）完稿的《诸蕃志》中述及“渺茫无际，水天一色，舟舶往来，唯以指南针为则，昼夜守视惟谨，毫厘之差，生死系焉”。赵汝室其人乃宋宗室，累官少保遗泽、朝散大夫。从嘉定十七年（1224）起，又官福建路、泉州市市舶提举，

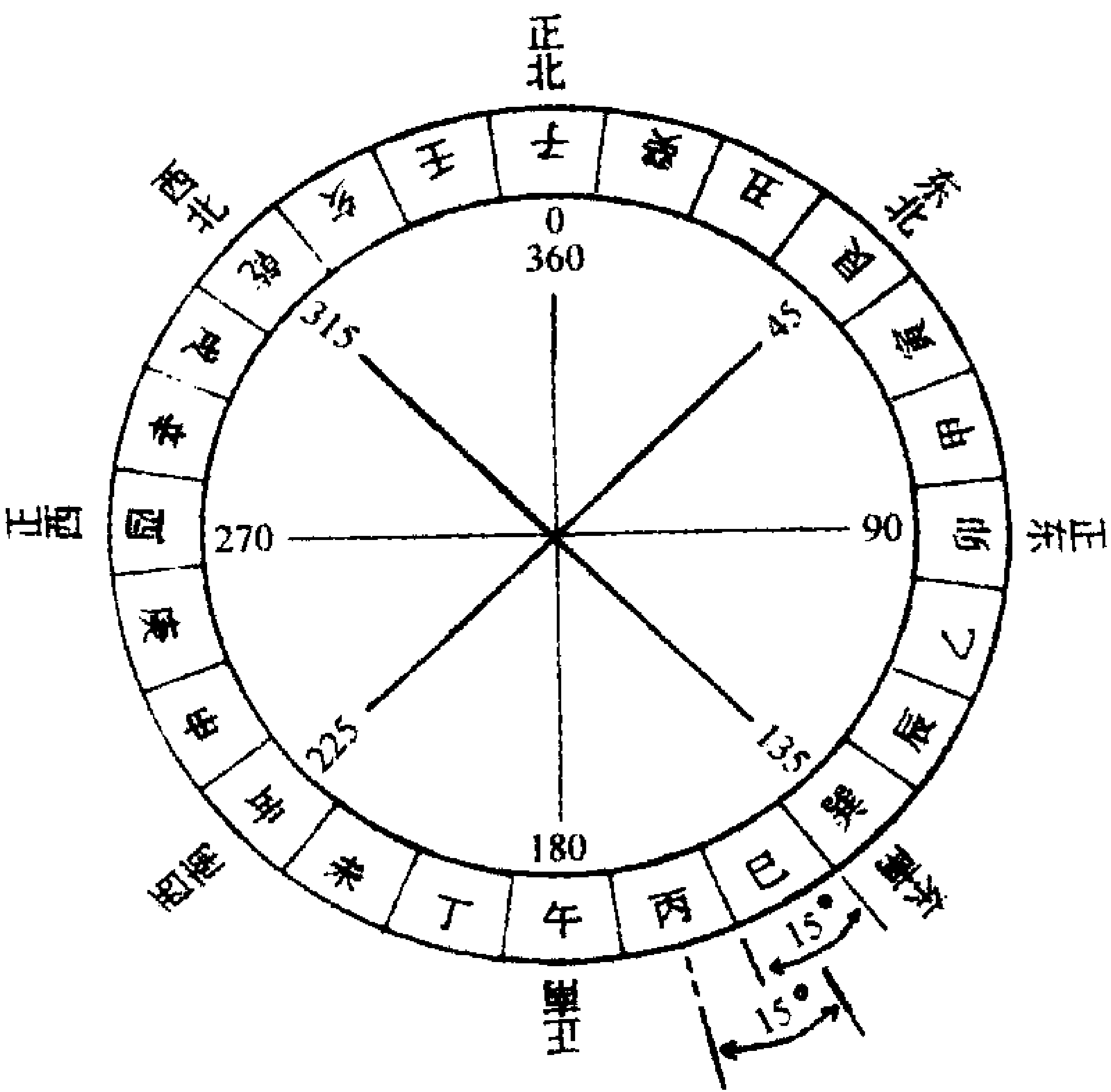


图47 罗盘方位与度数对应图

《诸蕃志》为其时其地搜罗泛海之事所成。后赵汝适半个世纪，吴自牧在其著《梦粱录》（成书于咸淳十年，即1274年）记述南宋自临安（今杭州）出海商贾之事，关于指南针，有同《诸蕃志》类似记载。“昼夜守视”指针且不能有“毫厘之差”，必是罗盘无疑。罗盘以24方位定向；若将相邻二向之隔档（也称“缝针”）算入，实为48向（图47）。因此，它可以指出7.5度内之航向差别。

上述各种堪舆用罗盘自然均可用以航海，但航海罗盘方位只需一层（或一圈）足够。航海罗盘需要简便、明了，易识易辨。在使用航海罗盘初期阶段，可能就是一个瓷碗或瓷盘，碗边上套接方位圈，或在瓷盘内底釉绘方位。打碎了，再来一个碗（或盘）。这种瓷碗，又称为“针碗”。在旅顺、大连、江苏丹徒县等海岸地区近几十年曾出土金元时代诸多针碗，甚至在河北磁县开河村元代木船上也发现过它。这种碗内底绘有穿过灯草的浮针图样，有些外碗底釉写“针”字（图48）。明代，华南窑还专门烧制供航海用瓷罗盘（图49）。这些都是早

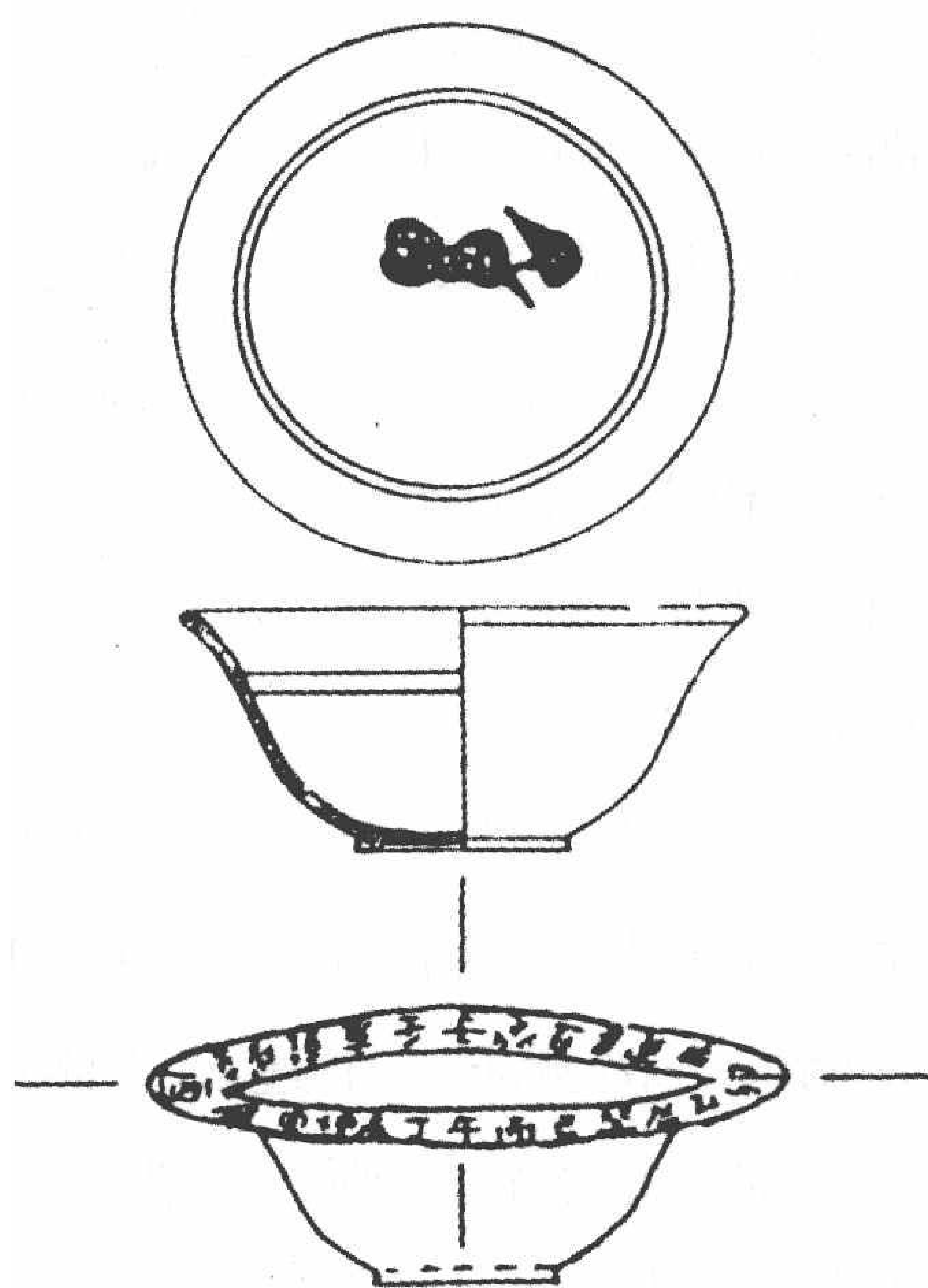


图48 针碗——航海水罗盘

期航海用的水罗盘。

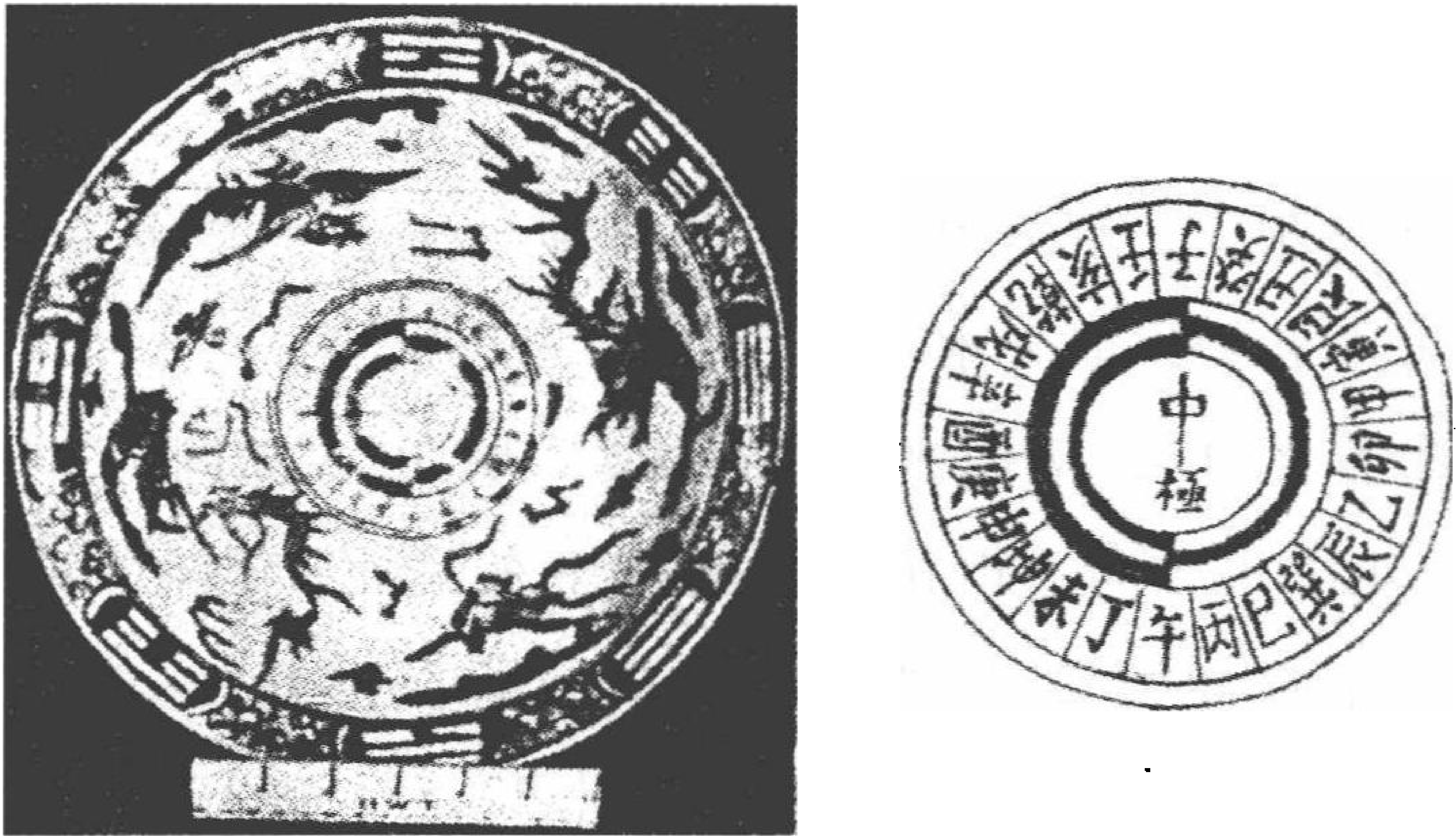


图49　八卦瓷罗盘（左）及其中央刻度盘放大示意图（右）

图50、51，是明清时期航海用罗盘。见之于文献所绘或明清实物藏于博物馆者，举不胜举。

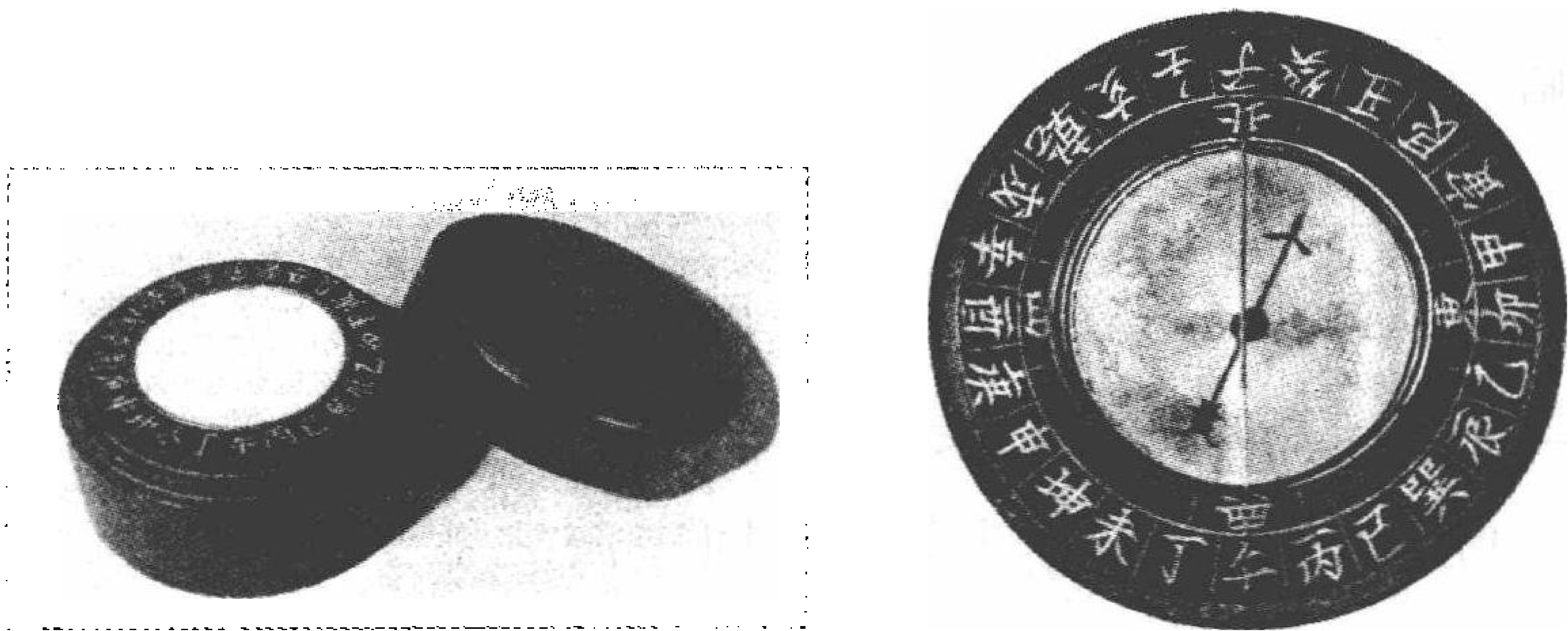


图50　明代航海水罗盘　　　　图51　清初制航海旱罗盘

航行经验的积累，促使人们知晓航路上各地点（如岛屿、暗礁或海上其他标志处）罗盘应取的方向。古代人称此为“针路”、“指南”，或“针经”、“针谱”、“针薄”。针路需与航行时间（或路程）同时应用，才能抵达目的地。

计算航程的长度单位为“更”，大致上，一昼夜分为十更，一更约为60里。明代成书的《指南正法》就“温州往日本针路”写道：

温州开舡，用单甲五更，用甲寅六更，用单寅二十更，用艮寅十五更，取日本山，妙也。

参看图47，从温州开船，取“单甲”方向，即罗盘“甲”正中央方向，也相当于船行于东偏北15°；行船“五更”之后，船改变为“甲寅”向，即在罗盘的“甲”与“寅”中缝方向，也即船行于东偏北22.5°；船行六更之后，又改为“单寅”向，即罗盘“寅”字正中方向，也即船行于东偏北30°；又船行二十更后，改“艮寅”向，即罗盘的“艮”与“寅”之中缝方向，也即东偏北37.5°，此向航行十五更，即抵达日本。据此针路计算，此抵达地为日本长崎。

《指南正法》又记述了由“日本回宁波针路”：

五岛开舡，用坤申七更，用庚申十五更，用单庚及庚酉二十五更，收入宁波是也。

再对照图47，不难发现，回宁波之罗盘取向基本上是往日本的反向。

以上所述，就是古代航海者所谓的针路。许多典籍中关于针路的文字记述，迄今尚可复原成航线图，且与今日航路或航线图一致。如元代周达观（约1275—1346）于元贞元年（1295）奉使真腊（今柬埔寨），写下《真腊风土记》，在是书“总叙”中述及针路如下：

自温州开洋，行丁未针。历闽、广海外诸州港口，过七洲洋，经交趾洋到占城。又自占城顺风可半月到真蒲，乃其境也。又自真蒲行坤申针，过昆仑洋，入港。

据此文字，考古学家夏鼐曾绘出它的针路复原图（图52）。古代人也绘有航海针路图。如，清代周煌于乾隆二十一年（1756）奉使琉球，著《琉球图志略》，并绘有福州至琉球的往返针路，其航线旁注明各地山川岛屿、针位、更数。明代茅元仪（约1570—1637）在其著《武备志》中留下一幅极为珍贵的郑和下西洋航海针路图（图53）。

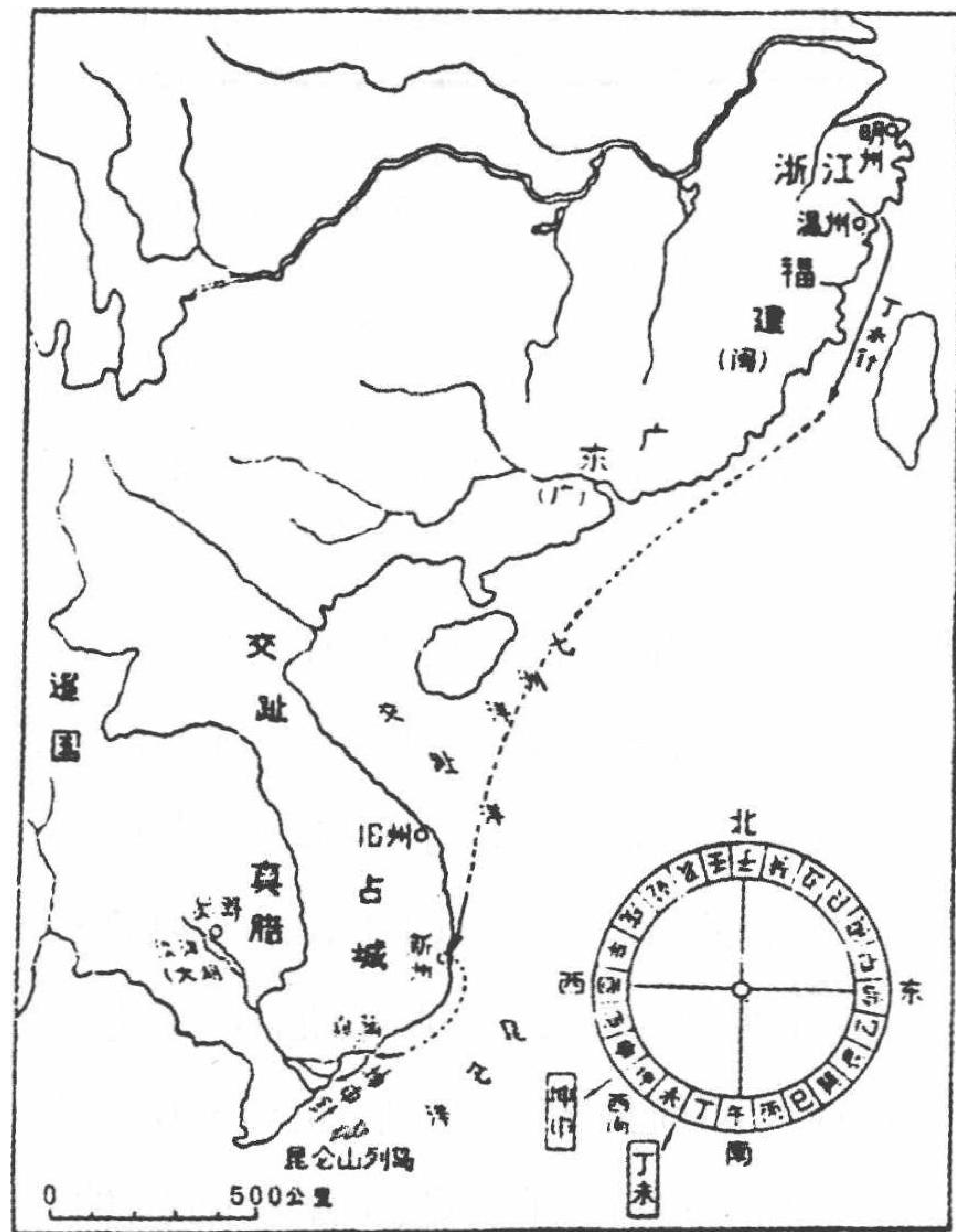


图52 夏鼐据《真腊风土记》绘福州至真腊针路



图 53　茅元仪《武备志》绘郑和航海图之局部

从溜山国（今马尔代夫群岛）至印度半岛西南海岸柯枝国（今柯钦）、古里国（今卡利卡特）一段航线。图中绘出航线上所见岛、山、国别、寺塔，标记牵星术度数，以及往返更路和针路。后者自右至左书写：寅针五十更，船收古里国；寅针二十五更收柯枝；用乙卯针二十五更收柯枝国；用甲卯针二十八更船收古里国。自左至右书写：用丹乙针二十八更收古里国；用卯针十五更收古里国；用卯针十六更收加加溜。

罗盘与针路二者相结合，使中国人成为远洋航行最早的国家之一。意大利人马可·波罗（Marco Polo，1254—1324）在元朝任职 17 年之后，于 1292 年搭乘护送蒙古公主阔阔真到波斯的航船回故乡。该船队为 14 艘四帆桅船，600 余人从福建泉州港启航，经苏门答腊、爪哇、印度沿海，抵达波斯。元代民间航海家汪大渊，于 1330 至 1339 年两次从泉州出发，行踪遍及南洋、印度洋、阿拉伯半岛，甚至东非。明初，三宝太监郑和于 1405 至 1433 年七次下西洋，

远达非洲肯尼亚。其船舰之巨、船队规模之宏、船载人数之多，航行海域之广，航海技术与指挥管理之高，堪称当时世界远洋之最。

六　罗盘西传及其影响

在欧洲或阿拉伯国家中，何时有文献记述指南针或罗盘？它们源自何处？这个问题一直为科学史家所关注。比利时出生的美国科学史学家萨顿（G. Sarton，1884—1956）在其名著《科学史导论》中，英国李约瑟博士在其巨著《中国科学技术史》中，甚至美国科学史家卡约里（F. Cajori）在其《物理学史》中都曾涉及大量的相关文献史料。它们证明中国人最早发明指南针、罗盘，发现地磁偏角。

有文字可查的，在欧洲最早述及指南针的是英格兰人尼卡姆（Alexander Neckam，1157—1217）。他在1190—1200年间成书的《The Nature of Things》书中曾说航海水手“用一根针与磁石接触。这根针于是就旋转，当其静止时其尖端指北”。1205年，法国德普罗万斯（Guyot de provins）曾说过，水手们“将磁石接触一根针，再把针固定在一根稻草上，使之浮于水面，于是针指北”。虽然其间还有些人有过类似的说法，但最早的尼卡姆之说也比沈括的《梦溪笔谈》晚100年，后者还不是有关指南针和罗盘的最早的

中国文献。

关于磁知识和罗盘在欧洲的重大进步是由法国珀勒里尼斯（Petrus Peregrinus，或写为 Perre de Maricourt）于 1269 年 8 月 12 日的一封信中写下的。他知道磁体的极性，知道强磁体会倒转弱磁体的极性，发明了有刻度和装上枢轴磁针的罗盘。他是路易九世军队中的工程师，也是中世纪少数从事实验工作的学者，但他尚未知晓磁偏角。他的罗盘比堪舆师王伋、杨维德的罗盘晚 200 余年，比朱服、朱彧父子在广州见到的航海指南针或罗盘晚 170 年，甚至比考古发掘的“张仙人瓷俑”中的旱罗盘（也是枢轴罗盘）模型还晚 70 年。

关于指南针或罗盘的阿拉伯文献比欧洲晚。13 世纪时，才有几种文献述及指南针或罗盘。一则文献是穆罕默德·乌菲（Muhammad al-Awfi）约 1232 年以波斯文编撰的《轶事集》，述及水手用磁石摩擦鱼形铁片；另一则文献是卡巴贾基（Bailak al-Qabajagi）于 1282 年撰写的《宝石大全》，内中述及他本人于 1242 年亲见水手使用水罗盘，指南针也是一片漂浮的鱼形铁片。

有鉴以上，一些历史学家提出，指南针或罗盘有可能是先从陆路经俄罗斯传入欧洲，最早的传播者或许兴趣于天文、地理，或兴趣于魔术。13 世纪初，从海上传到阿拉伯。

15 世纪，罗盘作为导航仪器，成就了欧洲冒险者、海盗和航海家，横渡大洋，来到亚洲。在郑和首次航行之后

40 年，1445 年葡萄牙航海家迪·迪亚斯（Dinis Dias）航行至西非塞内加尔，发现佛得角。又 40 年之后，即 1488 年，巴·迪亚斯（Bartltlmeu Dias）才绕过非洲南端。是一阵风暴将他的船只带过这个尖角而来到非洲南端的东海面上。于是，他将这个角命名为“风涛角”。葡王在听其风险经历后，改名风涛角为“好望角”（Cape of Good Hope）。在葡王的脑海中，绕过这个角，再继续向前，便是盼望已久的遍地黄金的希望之地。1497 年 7 月，达伽马（Vasco da Gama，1460—1524）奉葡王命出海，探寻土地、黄金、贸易。1498 年 5 月，达伽马抵印度南部大商港卡利卡特市。

马克思如此评价指南针的历史功绩：“指南针打开了世界市场并建立了殖民地”（《机器自然力和科学的应用》，人民出版社，1978 年，第 67 页）；又说，欧洲资本的兴起“一开始是以海盗方式积累”起来的。达伽马首次抵亚洲，途经非洲东岸基尔瓦（今坦桑尼亚），威胁该国国王臣服葡国；他在印度洋上捕俘阿拉伯商船，将船上几百名乘客、妇女活活烧死；下令卡利卡特市长官驱除阿拉伯商人，甚至不惜炮轰该城作威胁。马克思的言语是有诸多历史事实作根据的。

1492 年，意大利航海家哥伦布（C. Columbus，1451—1506）在西班牙国王赞助下作环球旅行，发现美洲大陆。他怀抱“圆形地球”观而作出地理大发现，令人赞佩。然其个人脾气粗暴蛮横，性格贪婪攫取，与不择手段的资本

开拓一致。

建立于1600—1873年的东印度公司，既是英国的垄断贸易团体，又是一个政治组织，是英政府在印度的代理行政机构。初，他与西班牙、葡萄牙、荷兰争夺印度香料。1612年获胜并取得巨额利润后，贸易渠道、地域、商业门类逐步扩大到波斯湾、东南亚、东亚。18世纪中叶起，以鸦片换取中国茶叶为主要贸易，终于导致19世纪震惊中外的鸦片战争。

正如弗兰西斯·培根所言，指南针、火药和印刷术的发明，“在世界范围内把事物的全部面貌和情况都改变了”。[①]

在交通史上应当指出的是，由于郑和横渡印度洋而抵东非，由于巴·迪亚斯绕过好望角，因此，东西交通的这一航线的一半是中国人开辟的，一半是欧洲人开辟的。

在科学史上尚需指出，罗盘传入欧洲后，欧洲人对它作出改进，使其更完善。尤为重要的革新是，将罗盘放入陀螺环（又称平衡环，即古代中国人发明的“被中香炉”）中。这种罗盘称为“卡丹吊环”。意大利数学家卡丹（Jerome Cardan 或写为 Cardano，或 Hieronymus Cardanus，1501—1576）并未要求这项发明权，平衡环的最初设计也非为罗盘而拟。他是在见到来自西藏的“油灯”（被中香炉

① 《新工具》，商务印书馆，1984年，第103页。

内装灯盏）后而设计车载坐椅，以便旅行者不感到道路颠簸。罗盘与被中香炉（图 54、55）都是中国人发明的。遗憾的是，中国人似乎从未想过将这两种发明物组装在一起。装入平衡环中的罗盘（图 56）在航海中不为风浪所影响，这是近代罗盘的最大优点。在航天史初期，20 世纪头 10 年将液态罗盘装入平衡环中，成为航天的重要仪器。除测定飞行方向外，利用磁针的地磁倾角（inclination）以测定飞行高度。

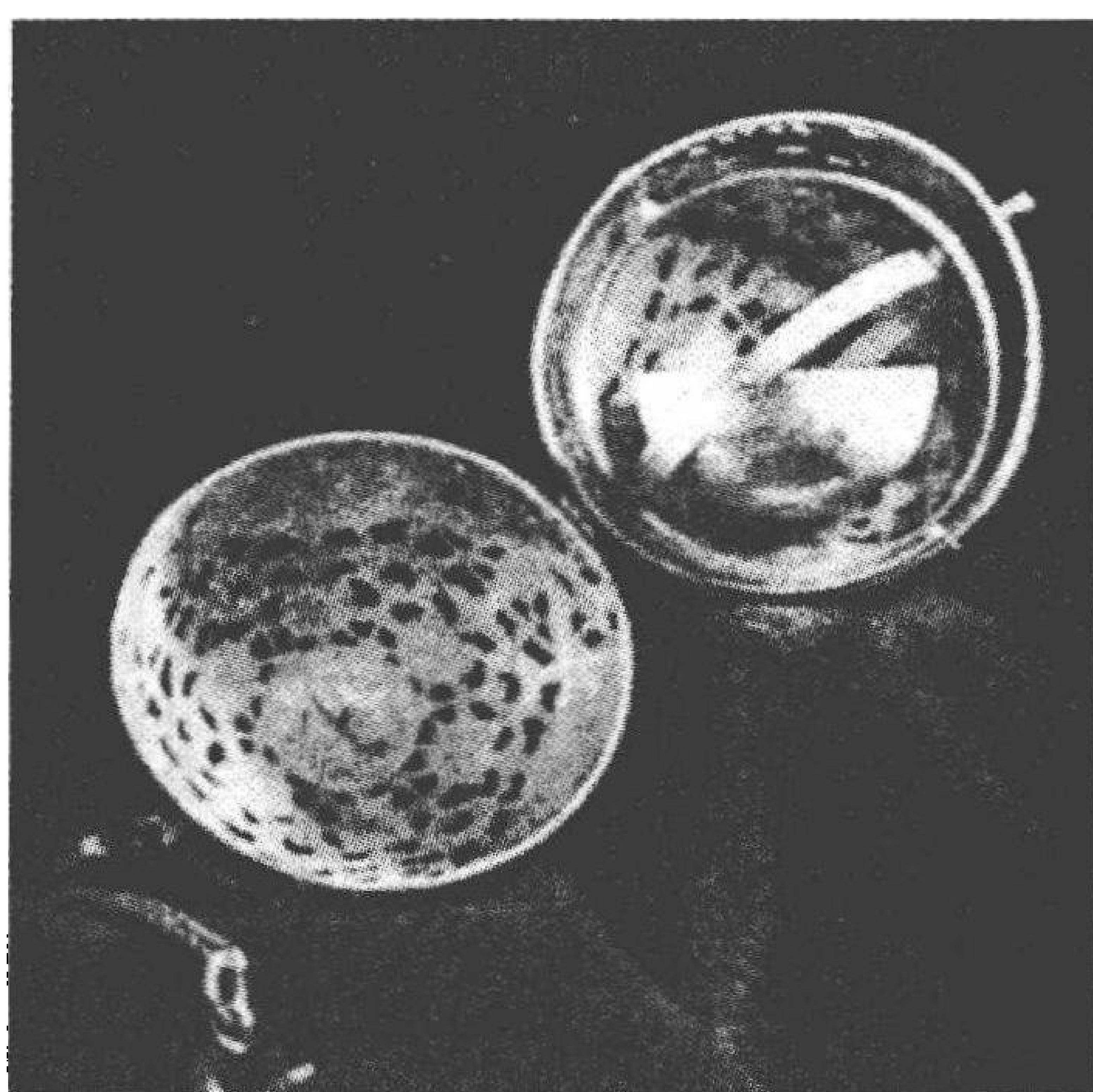
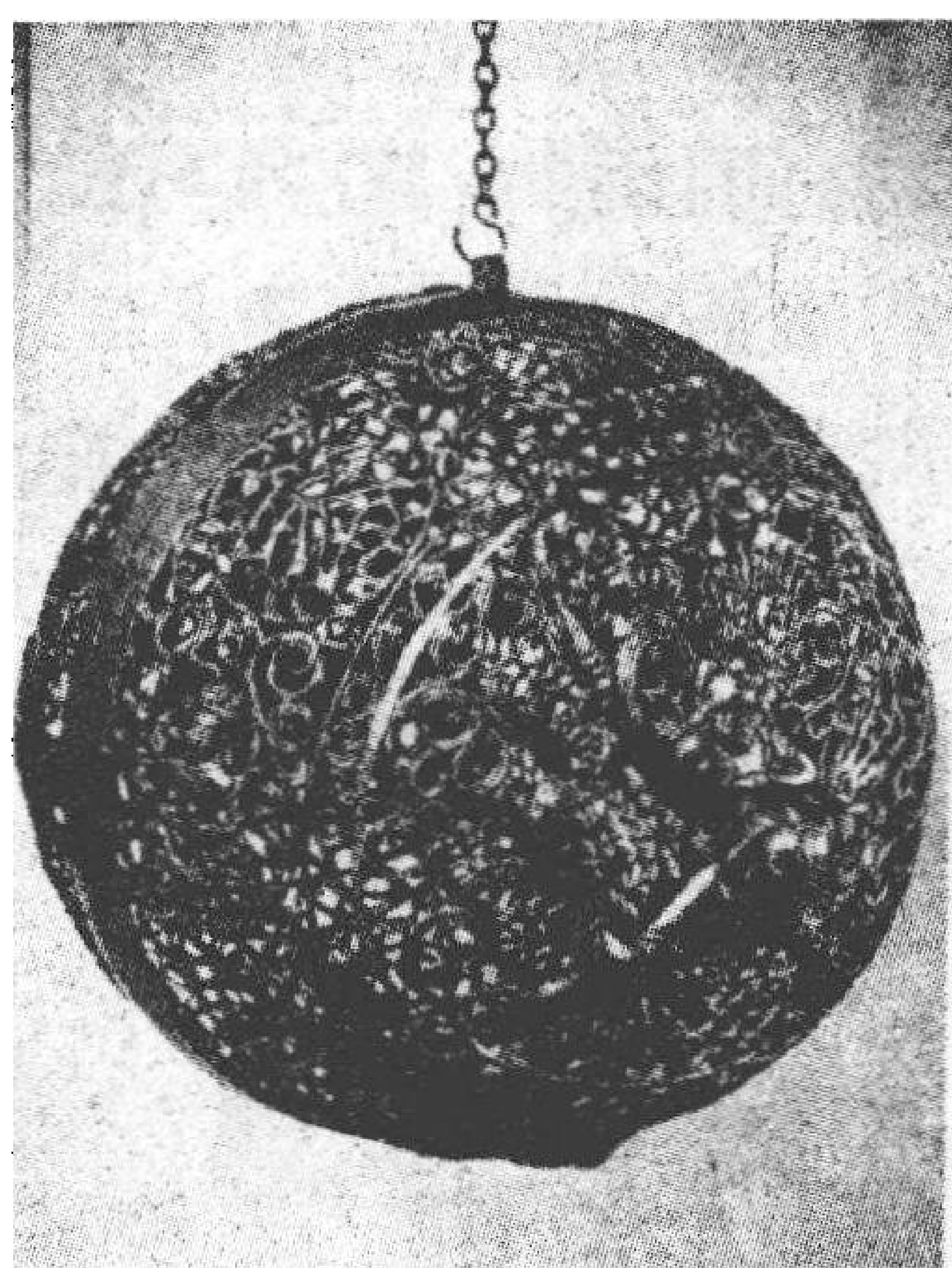


图 54　西安南郊沙坡村出土唐代银薰球



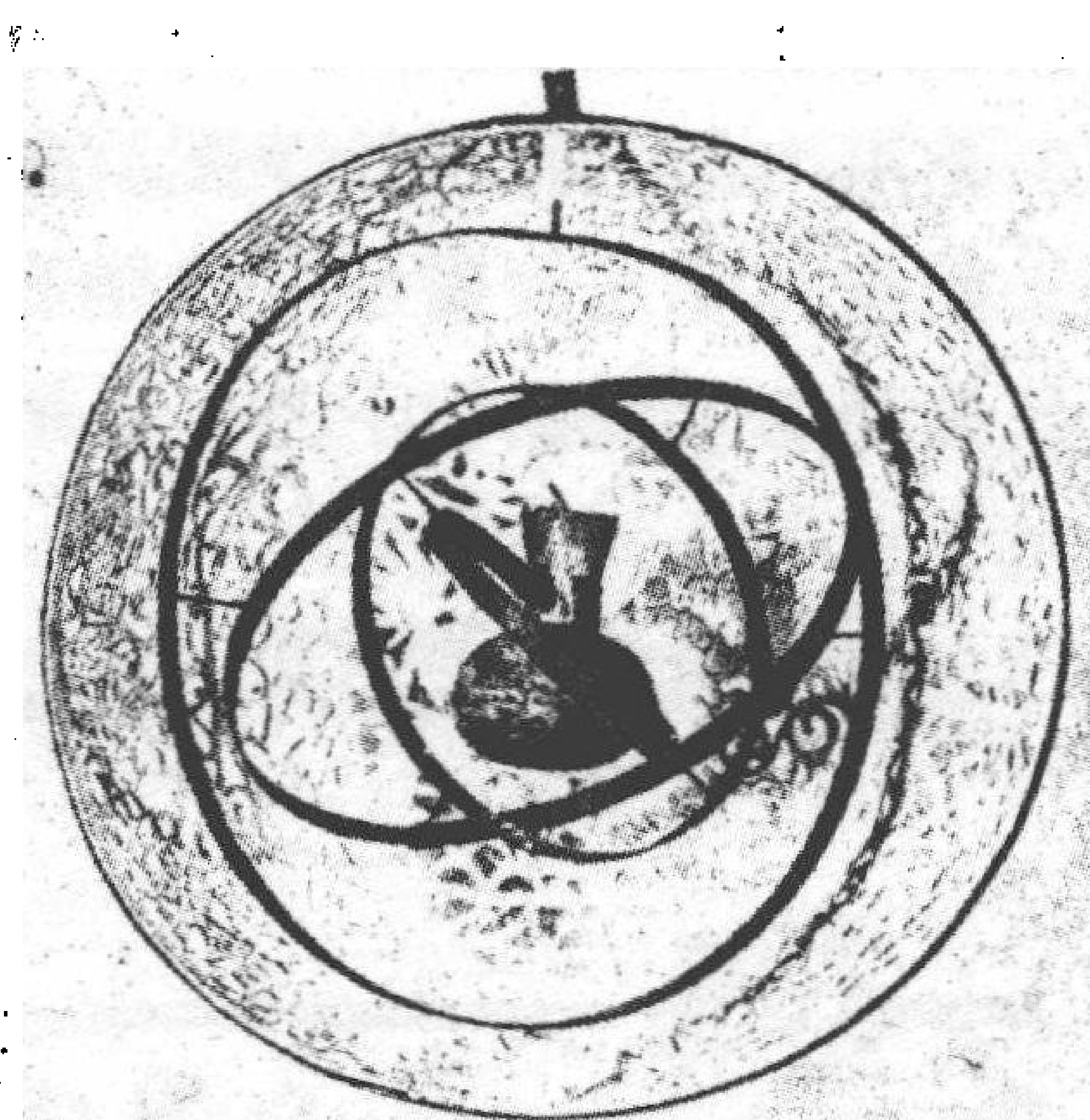


图 55　清代西藏铜灯球外壳及其内部结构

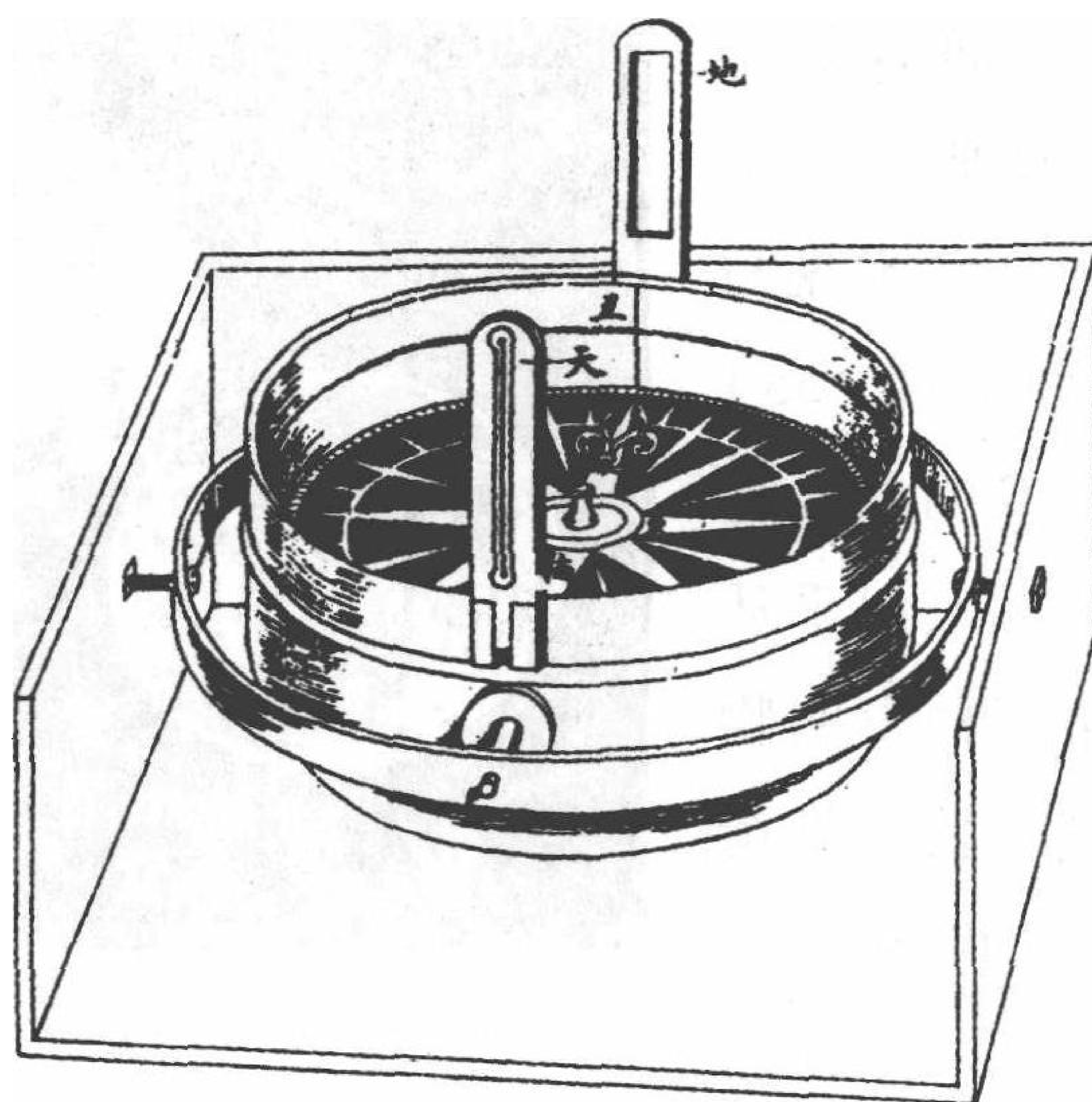


图 56　19 世纪欧洲航海罗盘

罗盘在诸如地平仪、测绘仪等仪器中使用而成为近代重要的科学仪器，其最初的方位盘面和磁针一起也成为近代工业技术、科学测试中各类仪器仪表设计的祖先。

［Ｇｅｎｅｒａｌ Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ］
书名＝中国古代物理学
作者＝戴念祖著
页数＝１２２
ＳＳ号＝１２８０１４７６
出版日期＝２０１０．０８